



Rene og effektive naturgassmotorer for tunge kjøretøy

Studie av ny teknologi for naturgassmotorer utført på oppdrag av
Vegdirektoratet/Samferdselsdepartementet

Rolf Hagman

Denne publikasjonen er vernet etter åndsverklovens bestemmelser og Transportøkonomisk institutt (TØI) har eksklusiv rett til å råde over artikkelen/ rapporten, både i dens helhet og i form av kortere eller lengre utdrag.

Den enkelte leser eller forsker kan bruke artikkelen/rapporten til eget bruk med følgende begrensninger:

Innholdet i artikkelen/rapporten kan leses og brukes som kildemateriale.

Sitater fra artikkelen/rapporten forutsetter at sitatet begrenses til det som er saklig nødvendig for å belyse eget utsagn, samtidig som sitatet må være så langt at det beholder sitt opprinnelige meningsinnhold i forhold til den sammenheng det er tatt ut av. Det bør vises varsomhet med å forkorte tabeller og lignende. Er man i tvil om sitatet er rettmessig, bør TØI kontaktes. Det skal klart fremgå hvor sitatet er hentet fra og at TØI har opphavsretten til artikkelen/rapporten. Både TØI og eventuelt øvrige rettighetshavere og bidragsyttere skal navngis.

Artikkelen/rapporten må ikke kopieres, gjengis, eller spres utenfor det private område, verken i trykket utgave eller elektronisk utgave. Artikkelen/rapporten kan ikke gjøres tilgjengelig på eller via Internett, verken ved å legge den ut på Nettet, intra-nettet, eller ved å opprette linker til andre nettsteder enn TØIs nettsider. Dersom det er ønskelig med bruk som nevnt i dette avsnittet, må bruken avtales på forhånd med TØI. Utnyttelse av materialet i strid med åndsverkloven kan medføre erstatningsansvar og inndragning, og kan straffes med bøter eller fengsel.

Forord

Denne rapporten er en studie av ny teknologi og utviklingspotensialet for naturgassmotorer. Studien er utført på oppdrag av Vegdirektoratet/ Samferdselsdepartementet innen rammene for *Forsøk med miljøvennlig teknologi og alternative drivstoffer*.

Busser med naturgass som drivstoff har i virkelig trafikk vist seg å ha høyt drivstofforbruk og i flere tilfelle relativt store utslipp av NO_x. Et av målene med prosjektet *Rene og effektive naturgassmotorer for tunge kjøretøy*, er å vise at forbrenningsmotorer med naturgass kan utvikles til konkurransedyktige alternativer til dieselmotorer. Videre var det et mål å foreslå et demonstrasjonsprosjekt med nye og effektive naturgassmotorer for bybusser i en norsk by som har tilgang til naturgass. De aktuelle byene er Haugesund, Trondheim eller Bergen. Et demonstrasjonsprosjekt ville ha til hensikt å stimulere til økt interesse og økt bruk av naturgass som drivstoff.

Prosjektet *Rene og effektive naturgassmotorer for tunge kjøretøy* har i hovedsak foregått som en litteraturstudie av ny teknologi. Kunnskaper om den seneste utviklingen ble oppdatert på NGV 2002, Natural Gas Vehicle Conference & Exhibition i Washington i oktober 2002. Rapporten er finansiert av Samferdselsdepartementet/Vegdirektoratet.

Per Magne Einang fra Marintek i Trondheim har ved samtaler videreformidlet verdifulle kunnskaper om magermotorkonseptet med naturgass som drivstoff.

Partic Oulette fra Westport Innovation i Canada har ved samtaler videreformidlet verdifulle kunnskaper om DING motorer med direkte innsprøyting av naturgass (dieselmotorkonsept).

Kontaktperson fra oppdragsgiverne har vært Espen Andersson Transportteknisk kontor, Vegdirektoratet. Assisterende avdelingsleder Arild Ragnøy har hatt ansvaret for kvalitetssikring. Avdelingssekretær Trude Rømming har sørget for utforming og layout.

Oslo, desember 2002
Transportøkonomisk institutt

Knut Østmoe
instituttssjef

Marika Kolbenstvedt
avdelingsleder

Innhold

Sammendrag

1 Bakgrunn, Naturgass i Norden.....	1
2 Krav til naturgassmotorer for tunge kjøretøy	4
2.1 Motorstyrke.....	4
2.2 Driftskostnader.....	5
2.3 Miljø.....	5
3 EU's avgasskrav for motorer til tunge biler.....	7
3.1 Effekter av variasjon i naturgassens sammensetning	10
4 Støkiometrisk forbrenning og naturgassmotorer	11
4.1 Lokalt forurensende avgassutslipp.....	13
4.2 Energiforbruk.....	13
4.3 Resirkulasjon av avgasser og støkiometrisk forbrenning	14
5 Mager forbrenning av naturgass.....	15
5.1 Lokalt forurensende avgassutslipp.....	16
5.2 Energiforbruk.....	18
5.3 Fortsatt utvikling med magermotorer	19
6 DING - Naturgassmotor med dieselmotorens egenskaper.....	20
6.1 Dieselmotoren.....	20
6.2 DING motoren	21
6.3 Westport Innovation's DING motor med pilottenning.....	23
6.4 DING motor med "hot spot" tenning.....	25
7 Mager forbrenning med direkte innsprøyting og tennplugg.....	26
7.1 Nissans SIDI motor for naturgass.....	27
7.2 SIDI motor med forkammer for naturgass.....	28
8 Homogen drivstoffblandning med kompresjonstenning HCCI	29
9 Problemer med naturgass i kjøretøy.....	31
9.1 Lagring av naturgass i kjøretøy	31
9.2 Fyllemuligheter og infrastruktur for naturgass	32
10 Konklusjon og demonstrasjonsforsøk.....	33
10.1 Konklusjon.....	33
10.2 Demonstrasjonsforsøk	34
Referanser.....	35

Sammendrag:

Rene og effektive naturgassmotorer for tunge kjøretøy

Naturgass og miljø

Metan i form av naturgass er en betydelig energiresurs som forventes å være tilgjengelig også etter at jordens gjenværende forekomster av råolje skulle være brukt opp. Metan er i form av biogass også fornybar energi som inngår i naturens kretsløp.

Naturgass som drivstoff i forbrenningsmotorer har de beste forutsetninger for å gi lite lokal forurensing i form av helseskadelige avgassutslipp. Grunnen til dette er at metan er en enkel hydrokarbonforbindelse og sannsynligheten for dannelse av partikler ved forbrenning er meget liten. Metan brenner relativt langsomt og med lav flammetemperatur. Metan gir derfor mindre utslipp av termisk NO_x (Nitrogenoksider) enn de fleste andre drivstoffer. Partikler og NO_x blir vurdert som de mest alvorlige luftforurensingskomponentene i Norge.

Metan gir ved forbrenning 25 % mindre utslipp av klimagassen CO₂ enn tilsvarende mengde energi fra bensin eller diesel. Forbrenning av metan gir derfor ved samme virkningsgrad i motorene 25 % redusert drivhuseffekt i forhold til forbrenning av bensin og diesel. Utslipp av uforbrent metangass bør unngås da metan, på grunn av sin evne til å reflektere varmestråling fra jorden, har en drivhuseffekt som er ca. 20 ganger større enn CO₂.

Globalt er naturgass det alternative drivstoff for transportsektoren som vokser raskest. I USA er nå annenhver buss som bestilles en naturgassbuss. Busser og andre tunge kjøretøy med store dieselmotorer er streke bidragsytere til luftforurensing i store byer. Utvikling av rene og effektive naturgassmotorer til tunge kjøretøy er derfor en satsing som kan bidra til bedre miljø.

De naturgassmotorer som i 2002 finnes på markedet kan være miljøvennlige i den forstand at de har lave utslipp av NO_x, partikler og andre lokalt forurensende avgasser. Dagens naturgassbusser har dieselmotorer som er bygget om til naturgassdrift. Motorene er bygget om med tennplugg og innblanding av naturgass i lufttilførselen til motoren.

Et konsept som har vært brukt og fortsatt brukes for ombygging av bussmotorer til naturgassdrift er støkiometrisk forbrenning og treveiskatalysator. Treveiskatalysatoren for bussmotorer renser avgassene på samme måte som treveiskatalysatorer i moderne personbiler med bensinmotor.

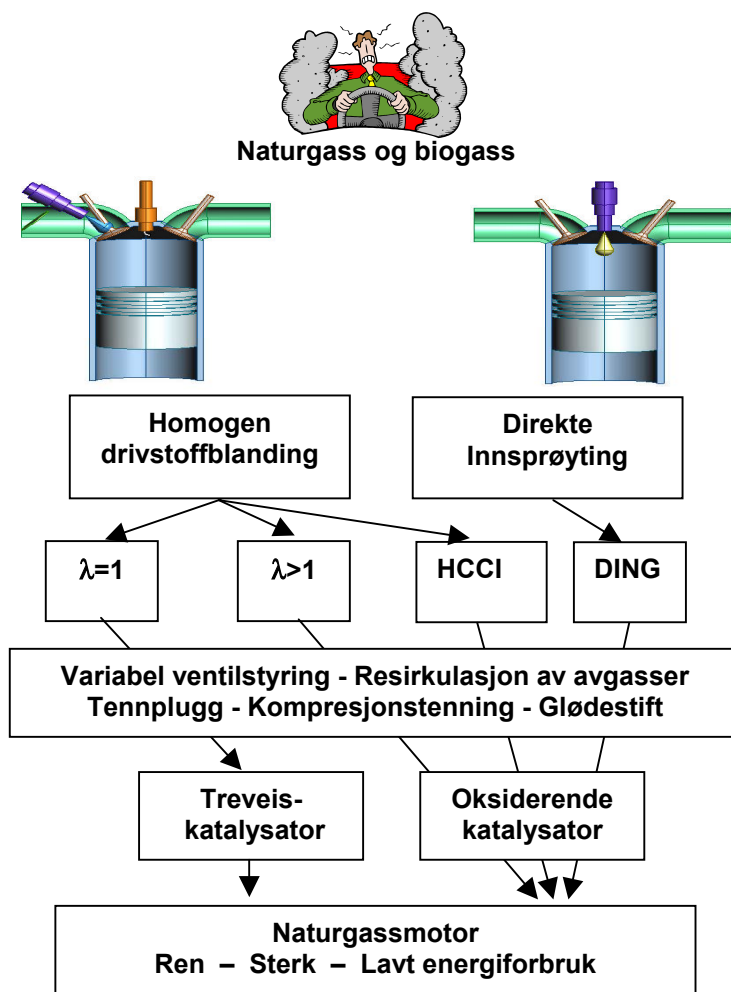
Det andre og dominerende konseptet er naturgassmotorer med mager forbrenning. Naturgassmotorer med mager forbrenning har lavere drivstofforbruk enn motorer med støkiometrisk forbrenning. Dagens naturgassmotorer med mager forbrenning

er ikke så sterke som dieselmotorer og har heller ikke det samme lave energiforbruket.

EU's avgassbestemmelser krever lave avgassutslipp og vil bli ytterligere skjerpet frem til 2008. Alle motorer med alle typer drivstoffer som leveres til nye tunge kjøretøy må fra 2005 oppfylle de samme avgassbestemmelsene. Med strenge avgasskrav for alle motorer og alle typer drivstoff kan det forventes at lavt energiforbruk i fremtiden vil få større betydning for alternative drivstoffer. Lavt energiforbruk er en forutsetning for å oppnå lave driftskostnader, og lave driftskostnader er nødvendig for salg av kommersielle kjøretøy i et konkurranseutsatt marked.

Status og muligheter

I denne rapporten drøfter vi nye konsepter for rene og effektive naturgassmotorer. Det pågår en omfattende forskning med diverse motorkonsepter for å utvikle naturgassmotorer som kan konkurrere med dieselmotorer til tunge kjøretøy. Det finnes flere veier for å nå dette målet!



Figur S.1: Metan i form av naturgass eller biogass er et utmerket drivstoff og det finnes flere veier som kan lede frem til en ren, sterk og mer effektiv naturgassmotor!

To veier synes å være mulige for å konstruere neste generasjons rene og effektive naturgassmotorer for tunge kjøretøy slik det går frem av figur S.1. Den ene veien er videreutvikling av det dominerende konseptet med magermotorer og homogen luft/drivstoffblanding. Videreutvikling av magermotorkonseptet er i denne sammenheng alt fra bedre styring av blandingsforholdet mellom luft og drivstoff til HCCI, Homogenous Charge Compression Ignition. Europeiske produsenter av motorer til tynge kjøretøy og europeiske forskningsmiljøer synes å ha størst tro på videreutvikling av magermotorkonseptet.

Den andre veien er slik det går frem av figuren Direkte Innsprøyting DING, Direct Injection Natural Gas motorer. DING er egentlig moderne dieselmotorer med naturgass som drivstoff. Med DING motorer er utfordringene fremfor alt utvikling av injektorer for naturgass og tenning av naturgassen. Westport Cummins i USA/Canada har utviklet DING motorer som går i prøvedrift i lastebiler og hevder at disse vil bli kommersielt tilgjengelige i 2004.

Er så naturgassmotorer i det hele tatt interessante? Venter vi ikke på et snarlig gjennombrudd for brenselcelleteknologi med hydrogen som energibærer? Blir ikke dieselbusser fra 2005/2008 så rene at annen teknologi er overflødig?

Svar på disse spørsmålene er at flere analyser viser at naturgass er en meget konkurransedyktig energibærer. Energiforbruket fra kilde til nyttig transportenergi (well to wheel) er for naturgass lavere eller på samme nivå som for brenselceller med hydrogen som drivstoff. Det er også usikkerhet når det gjelder å vurdere kostnader og driftsikkerhet for brenselceller til kjøretøyer.

Det kan bli vanskelig for naturgassmotorer å konkurrere med dieselmotorer. Rensing av dieselavgasser fra tunge kjøretøy kan gi meget lave utslipp av lokale forurensningskomponenter. Rensing av dieselavgassene medfører likevel økte kostnader for anskaffelse og vedlikehold av dieselmotorer. Det gjenstår å se om fremtidens dieselmotorer med elektronisk regulering av rensesystemer blir like driftsikre og robuste som dagens.

Om strategien med homogen luft/drivstoffblanding eller direkte innsprøyting for naturgassmotorer blir det vinnende konseptet, kan bli et spørsmål om kostnader og om tidspunkt for markedsintroduksjon. Spørsmålet om gass eller flytende energibærere for bybusser blir i dag besvart med både gass og diesel. På samme måte er det mulig at både mager forbrenning av en homogen luft/drivstoffblanding og direkte innsprøyting av gass har livets rett.

Naturgass som energibærer for transportsektoren har ulemper. Plass for lagring av gassen er et stort problem. Volumet for gass og tanker blir 4-5 ganger større enn for tilsvarende mengde med bensin eller diesel. Bybusser med drivstofftanker på taket, er den type kjøretøy som har flest fordeler og minst ulemper med naturgass som drivstoff.

Tilgang på fyllingsanlegg for naturgass er et annet problem. Manglende fyllestasjoner er de fleste steder i verden en hindring for vekst i antallet naturgasskjøretøyer. Økt bruk av naturgass innen transportsektoren forutsetter selvsagt fyllestasjoner og konkurransedyktige priser på gass og kjøretøy.

Demonstrasjonsprosjekt - konklusjon

En av hensiktene med dette prosjektet var å foreslå demonstrasjonsforsøk med nye og rene naturgasskjøretøy i noen av de norske byer som fra før har naturgassbusser. Det har vært kontakt med Scania som har dieselmotorer som passer for konvertering til DING motorer med teknologi fra Westport Innovation. Videre har det vært kontakt med SAAB i Trollhättan som vurderer naturgassmotorer i personbiler.

Kontaktene med motorprodusentene har ikke resultert i konkrete planer for demonstrasjonsprosjekter. Motorutvikling til kommersielle kjøretøy er et kostbart, omfattende og komplekst arbeid.

Motorutvikling til lette og tunge biler er en relativt lukket verden. De som deltar i utviklingen får av konkurransegrunner som regel ikke lov til å videreformidle sine resultater. Demonstrasjonsprosjekter er ofte ikke aktuelle før en motor er ferdig utviklet. Produsenter av motorer til busser og biler på et konkurranseutsatt marked foretrekker en gradvis utvikling fremfor dramatiske forandringer. Markedet skal ikke forstyrres og risikere å utsette investeringer i nye kjøretøyer på grunn av rykter om at nye og betydelig bedre motorer vil komme neste år.

Ofte er det kun når fremtidsutsiktene for en ny teknologi er usikker som det blir skapt stor publisitet. Motorprodusentene synes i 2002 å være usikre når det gjelder teknologien med direkte innsprøyting av naturgass. Lite informasjon er tilgjengelig fra motorprodusentene når det gjelder den videre utviklingen av magermotorkonseptet med homogen luft/drivstoffblanding.

Mer effektive naturgassmotorer for tunge kjøretøy er ikke modne for lokale demonstrasjonsforsøk i Norge. Forutsetningen for å gå videre med å se på bruk av naturgass i transportsektoren på et nasjonalt plan er at tilgangen til naturgass må avklares nærmere. Det må ses i sammenheng med den nødvendige infrastruktur og øvrig bruk av naturgass i Norge. Vurderinger om videre utbygging av infrastruktur og bruk av naturgass i Norge ser nå ut til å være en mer realistisk oppgave enn demonstrasjonsprosjekter med naturgassmotorer i busser. Situasjonen kan likevel raskt forandres for de områder som vil ha tilgang på naturgass, når det blir tilgang til mer effektive motorer. Tilgang til mer effektive naturgassmotorer er avhengig av de store motorprodusentenes markedsvurderinger.

Vi vil med denne rapporten vise at utviklingsmulighetene for forbrenningsmotorer fortsatt er store og at naturgass er et interessant alternativt drivstoff. Det er bred enighet om at naturgass vil være en viktig energikilde i dette århundre, men som drivstoff for kjøretøyer vil naturgass konkurrere med andre energibærere.

1 Bakgrunn, Naturgass i Norden

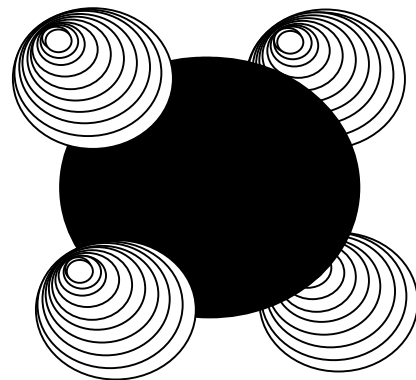
I begynnelsen av 1990 tallet ble naturgass i transportsektoren utredet og drøftet i mange sammenheng. Mange rapporter og utredninger ble gjennomført. Blant annet konkluderer sluttrapporten fra det Nordiske GasBuss prosjektet (Ekelund m fl, 1993) med at busser og andre tunge kjøretøy med naturgass kan få de laveste utslippene av NO_x og partikler av alle tilgjengelige drivstoffer. Potensialet for enda lavere avgassutslipp i fremtiden og muligheten å bruke bærekraftig biogass blir vurdert som spesielt interessant. Rapporten sier at industrielle, sosiale, økonomiske, energipolitiske og miljømessige motiver taler for natur og biogassdrevne tunge kjøretøy. Det blir også argumentert med at fremtidig teknikk- og markedsutvikling med fordel kan skje i de nordiske land.

Naturgass er det alternative drivstoff til transportsektoren som vokser raskest. Argentina er det landet i verden som har flest (800 000) kjøretøyer med naturgass som drivstoff. Grunnen til det store antallet kjøretøyer i Argentina er stor tilgang og lave priser på gass. I Japan øker siden 10 år tilbake antallet naturgasskjøretøyer med ca. 60 % per år, men det totale antallet er foreløpig (2001) ikke større enn ca. 12 000 (Honjo m fl, 2002). I USA er (2002) annenhver buss som bestilles en naturgassbuss (Bienfield, 2002).

Naturgass er en viktig energikilde. Naturgass forventes å få økt betydning etter hvert som jordens gjenværende oljetilganger minsker. Jordens resurser av naturgass er store og beregnes å rekke minst frem til 2100. Norge har de største resursene av naturgass i Europa. Metan er dessuten i form av biogass en fornybar og bærekraftig resurs som inngår i naturens kretslop.

Metan i naturgass og biogasser er et utmerket drivstoff for forbrenningsmotorer. Metanmolekylet består av et karbonatom og fire hydrogenatomer. Metan er den enkleste hydrokarbonforbindelsen som finnes. Det lette molekylet har omtrent den samme vekten som andre molekyler i luft og blander seg derfor godt med luften i et forbrenningsrom. En god og homogen blanding med luft er den beste forutsetningen for fullstendig forbrenning. Molekylene i metan inneholder kun et karbonatom hvilket bidrar til at dannelsen av partikler blir minimal ved normal forbrenning. Metan brenner med lav hastighet og med lav flammtemperatur hvilket bidrar til lite termisk NO_x i avgassene.

Metan gir ved forbrenning 25 % mindre utslipp av klimagassen CO_2 enn tilsvarende mengde energi fra bensin og diesel. Ved bruk av forbrenningsmotorer med lik virkningsgrad vil derfor naturgassmotorer gi ca. 25 % mindre utslipp av klimagassen CO_2 enn de tradisjonelle



Figur 1.1: Metan består av enkle molekyler med et karbonatom og fire hydrogenatomer

drivstoffene. Utslipp av uforbrent metangass er uheldig, da metan på grunn av sin evne til å reflektere varmestråling fra jorden har en drivhuseffekt som er ca. 20 ganger større enn tilsvarende mengde CO₂.

Hvordan har det så gått med naturgass til transportsektoren i Norden? Bybusser er med drivstofftanker på taket det mest nærliggende markedet for naturgass. En flåte av bybusser klarer seg med få fyllestasjoner og gasstankene på taket stjeler ikke verdifull passasjerplass.

I Malmö går nå i 2002 samtlige busser i byen med naturgass som drivstoff. Malmö har naturgassbusser fra Volvo, Scania og Mercedes. Også andre byer i Sverige har en stor andel busser som går på natur- eller biogass. De fleste større byer i Norden som har adgang til fyllestasjoner for på natur- eller biogass bruker denne gassen i bybussene for å redusere problemer med luftforurensing.

I Norge har byene Haugesund, Trondheim og Bergen adgang til naturgass. Haugesund og Trondheim har noen få naturgassbusser hver. Bergen har en større flåte. En utredning om kollektivtrafikken i Bergen i viser at busser med naturgassmotorer og mager forbrenning i virkelig trafikk har et energiforbruk som var 20-30 % høyere enn tilsvarende diesibusser (Stølan m fl, 2000).



Figur 1.2: Bybusser med gasstanker på taket bidrar til redusert luftforurensing og er en type kjøretøyer som passer godt for naturgassdrift

Ved Marintek i Trondheim utviklet man allerede i begynnelsen på 1990-tallet tekniske løsninger for å forandre bussmotorer til naturgassmotorer. Både en Volvo og en Scania dieselmotor ble bygget om og tilpasset magermotorkonseptet med naturgass. Volvo og Scania har siden ført magermotorkonseptet videre og er nå i 2002 verdensledende leverandører av gassbusser.

Marintek arbeider vider med utvikling av naturgassmotorer og har designet konseptet for verden første ferge som går på naturgass. Fergen Glutra går i daglig drift i Møre og Romsdal med flytende naturgass som energibærer. Andre skip med naturgass som drivstoff er under bygging i Norge.



Figur 1.3: Fergen Glutra bidrar med naturgass som drivstoff til betydelige miljøgevinster i forhold til om den hadde brukt marin tungolje

Naturgass til skip erstatter forurensende marin tungolje med høy svovelhalt. I kystnære områder vil derfor ferger og skip med naturgass som drivstoff ha en betydelig miljøeffekt.

Er så naturgassmotorer i det hele tatt interessante? Venter vi ikke på et snarlig gjennombrudd for brenselcelleteknologi med hydrogen som energibærer?

Usikkerheten er foreløpig stor når det gjelder brenselceller og hydrogen. Det er vist at brenselcelleteknologien fungerer i demonstrasjonsbusser og personbiler,

men er det mulig å oppnå tilfredsstillende driftsikkerhet og konkurransedyktige priser?

Utfordringene med bærekraftig produksjon av hydrogen i stor skala er ikke løst. Hydrogen til bruk i brenselceller må produseres ved hjelp av en energikilde. Energi fra vannkraft gir med elektrolyse av vann en bærekraftig energikjede for produksjon av hydrogen. Problemet er at elektrisk energi er en meget begrenset resurs og det ikke finnes så store mengder med gjenværende vannkraft som kan bygges ut.

Foreløpig synes naturgass å være den beste råvaren og energikilden for produksjon av hydrogen. Naturgass med fire hydrogenatomer i hvert metanmolekyl er det mest konkurransedyktige alternativet for produksjon av hydrogen. Analyser av energiforbruk og kostnader har vist at naturgass i et energiregnskap fra energikilde til nyttig transportenergi (well to wheel) er en konkurransedyktig energibærer både i forhold til diesel og hydrogen (Wriss m fl, 2000).

Blir ikke dieselbusser med nye avgassregulativer fra 2005/2008 så rene at det å vurdere annen teknologi er unødvendig? Det er vist at rensing av avgassene fra tunge kjøretøy med dieselmotorer kan gi minimale utslipp av lokalt forurensende avgasser. Renseutstyr og nøyaktig regulering av motorene medfører dog økte kostnader for både anskaffelse og vedlikehold.

Det er bred enighet om naturgass som en fremtidig stor og viktig energikilde. Naturgass og all gass har dog sine ulemper som energibærer i kjøretøy. Naturgass har lavere energiinnhold per vektenhet og trenger å oppbevares i en trykkbeholder. Trykkbeholderne dimensjoneres for å kunne oppbevare naturgass med trykket 200-300 bar. Trykkbeholderen tar 4-5 ganger så stor plass og er mer kostbar enn en tilsvarende bensintank.

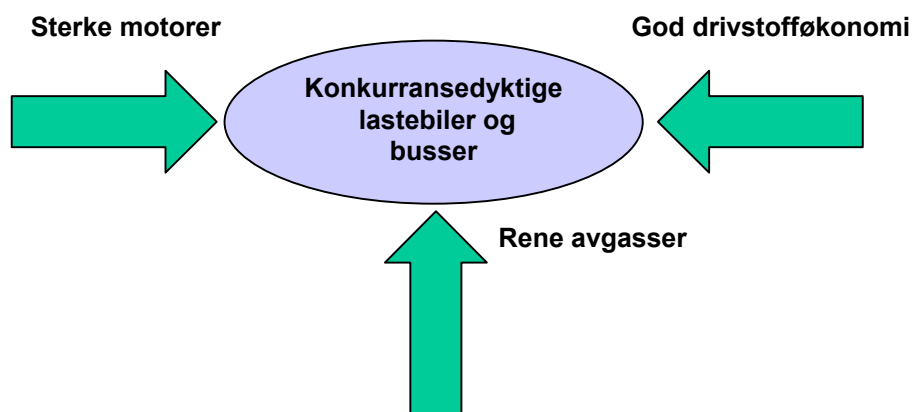
Et alternativ til å bruke naturgass som energibærer er å produsere syntetisk bensin eller diesel med naturgass som råvare og energikilde. Denne prosessen kalles ofte GTL (Gas To Liquids). Fremstilling av syntetisk bensin og diesel gir høyere drivstoffkostnader enn å bruke gassen direkte. På den andre siden gir syntetisk bensin eller syntetisk diesel lavere distribusjonskostnader og enklere lagring av drivstoffet i kjøretøyet.

DME, Dimetyleter er et interessant drivstoff med flere egenskaper som egner seg spesielt godt for dieselmotorer. DME har de samme gode forutsetningene som naturgass når det gjelder avgassutslipp. DME har dessuten et meget høyt cetantall som er ønskelig for drivstoff til dieselmotorer. DME er som naturgass en gass ved normal temperatur, men går over til flytende form allerede ved 4-6 bar. DME kan med prosesseteknologi fra Haldor Topsøe A/S (Danmark) og med relativt lite energitap produseres med naturgass som råvare og energikilde.

2 Krav til naturgassmotorer for tunge kjøretøy

Et kommersielt marked for naturgassmotorer til tunge kjøretøyer som busser, lastebiler, vogntog og distribusjonsbiler stiller tre typer krav. Kravene går på motorstyrke, drivstofføkonomi og avgasser som vises i figur 2.1.

For å kunne konkurrere i det harde kommersielle markedet for motorer til tunge kjøretøyer er det på lengre sikt nødvendig å kunne tilby naturgassmotorer som er på topp når det gjelder så vel motorstyrke som avgasser og energiforbruk. Kun på kort sikt vil offentlig støtte kunne kompensere for svak ytelse innen et eller flere av disse områdene. I 2002 er situasjonen i Norge slik at fritak fra skatter og avgifter til stor del kompenserer for høyt energiforbruk med alternative drivstoffer.



Figur 2.1: Fremtidens naturgassmotorer for tunge kjøretøyer må for å være konkurransedyktige være på topp når det gjelder så vel motorstyrke som rene avgasser og energiforbruk

2.1 Motorstyrke

Fra kunden og brukerens perspektiv skal kjøretøyene ha en sterk motor for å kunne tilby rask akselerasjon, god fremkommelighet og fleksibilitet i trafikken. Motoren må ikke være for stor og tung i forhold til ytelse. Motoren må ikke bare gi høy effekt ved høye turtall men den må også gi et høyt dreiemoment ved lave turtall. Mulighetene til rask akselerasjon, evnen til å trekke tung last og god gjennomsnittshastighet er absolutte krav fra brukere og eiere til tunge kjøretøyer.

2.2 Driftskostnader

Kostnader for anskaffelse, drift og vedlikehold er helt avgjørende ved kjøp av busser og lastbiler.

Motorene må ha et lavt energiforbruk for å oppnå lave driftskostnader for en transportbedrift i et konkurranseutsatt marked. Om kostnadene for drivstofforbruk er høyt eller lavt er ofte avgjørende for om en transportvirksomhet går med gevinst eller tap. Hele konkurransesituasjonen påvirkes selvfølgelig også av at naturgassen har en konkurransedyktig pris i forhold til andre drivstoffer. At verdens gjenværende resurser av naturgass er betydelig større enn de gjenværende resursene av råolje taler for en fremtidig gunstig utvikling av naturgassprisen i forhold til prisen på bensin og diesel.

Infrastruktur er en utfordring for nye energibærere som er i gassform ved normal trykk og temperatur. Tilgangen på fyllestasjoner og rørledninger med naturgass må være god slik at det ikke er nødvendig med ekstra kjørelengde og ekstra kostnader for å få tak i drivstoff.

2.3 Miljø

Det fremste salgargument for naturgassmotorer til tunge kjøretøyer har vært og er (i 2002) at rene avgasser er viktige for helse og miljø. Dette er grunnen til at annenhver buss som bestilles i USA er en naturgassbuss. I USA kjøper bedrifter seg nå frie fra kostbare miljøtiltak i egen virksomhet ved å investere i andre tiltak som gir tilsvarende eller bedre miljøeffekt for samfunnet.

Fra myndigheter og fra utsatte grupper av mennesker kommer ønsker og krav om lave avgassutslipp. Kravene til avgassutslipp fra dieselmotorer til tunge kjøretøyer har gradvis blitt skjerpet. Kravene til avgassutslipp fra motorer med alternative drivstoffer har ikke vært like klare. Fra 2005 vil kravene i Europa bli de samme for motorer med alternative drivstoffer som for dieselmotorer. Fra 2008 vil grensene for alle typer helseskadelige avgasskomponenter i Europa og Amerika være lavere enn en tiendedel av hva de var på 1980 tallet. De lave utslippsgrensene vil gjelde for alle typer av drivstoffer og for alle typer motorer.

Det kan forventes at fokuseringen på helseskadelige avgassutslipp fra kjøretøyer vil minske i fremtiden. Dette kan synes å være en merkelig og kontroversiell påstand i et samfunn som blir mer og mer bevisst trusler mot helse og miljø. Begrunnelsen for påstanden er, at fra 2005 må alle nye kjøretøy oppfylle de strenge lovfestede utslippsgrensene for å kunne selges. Avgassutslipp fra kjøretøyer som oppfyller 2008 kravene skulle fra EU's opprinnelige utgangspunkt ikke lengre være et problem for helse og miljø. I henhold til denne tankegang vil alle kjøretøyer bli tilstrekkelig rene. Således vil valg av kjøretøyer med alternative drivstoffer mer bli et spørsmål om kostnader i stedet for et spørsmål om helse og miljø.

I virkeligheten tar det lang tid for effektene av nye avgasskrav får full effekt. Alle eldre og mer forurensende kjøretøy skal skiftes ut og det tar gjerne 15-20 år. Videre vil synet på hva som er alvorlige helseskadelig utslipp forandres etter hvert som kunnskapene om effektene på mennesker øker.

For å klare de strenge kravene for motorer til tyngre kjøretøy i Europa (2005/2008) og Amerika (2007) pågår et intensivt og omfattende utviklingsarbeid av store dieselmotorer. Utviklingsarbeidet tar sikte på å utvikle motorer og avgassrensing som gir nesten null utslipp av lokalt forurensende avgasser.

Nye personbiler har som regel bensinmotorer med λ -regulering, støkiometrisk forbrenning og treveiskatalysator. Avgassutslippene fra nye personbiler har i noen tilfeller blitt betydelig lavere enn hva myndighetene krever (Hagman, 2001). Med nøyaktig styring og regulering av luft/drivstoff blandingen (λ -regulering) er det i fremtiden teknisk mulig å oppnå så lave verdier på utslippene av NO_x , HC og CO som myndighetene vil kreve. Utslipp av helseskadelige avgasser fra diesel og bensinmotorer vil bli et spørsmål om kostnader for renseutstyr (Wriss m fl, 2000).

For lastebiler og busser har dieselmotoren tradisjonelt vært det eneste realistiske alternativet. Dieselmotoren har vært foretrukket på grunn av sitt høye dreiemoment ved lave turtall, lavt energiforbruk og sin høye driftssikkerhet. For å kunne klare EU's avgasskrav fra 2008 (EURO 5) vil dieselmotorer med diesel som drivstoff med stor sannsynlighet trenge NO_x -reducerende katalysatorer og partikkelfilter.

For at partikkelfilter og NO_x katalysatorer skal fungere tilfredstillende stilles også krav til drivstoffene. Det er spesielt svovelinholdet som må ned på et så lavt nivå at katalytiske rensesystemer for avgassene får tilfredsstillende holdbarhet. EU's krav er maksimalt 30 ppm svovel i drivstoffer fra 2005. Forsøk har dog vist at det kan bli nødvendig å komme ned til svovelskonsentrasjoner på 7-10 ppm for å oppnå tilfredsstillende lang levetid med de mest effektive avgassrensesystemene.

Når det gjelder å oppfylle de stadig strengere avgasskravene har naturgass den fordel at forbrenningen av naturgass har potensial om å gi både lave partikkel- og NO_x utslipp. Dette i motsetning til forbrenning av diesel som enten gir høye verdier på partikler eller høye verdier på NO_x . Naturgass inneholder også naturlig svovelmengder på under 7-10 ppm og avgassenes svovelinhold er derfor ingen trussel mot eventuelle rensesystemers holdbarhet.

I tillegg til de helseskadelige avgassutslipp som nå omfattes av EU's krav for typegodkjenning er det sannsynlig at man i fremtiden også vil stille nye krav. De nye kravene kan gå på drivhusgasser, energiforbruk og hittil uregulerte toksiske avgassutslipp som kan gi risiko for helse eller miljø .

Når det gjelder utslipp av toksiske og kreftfremkallende stoffer som ikke er regulert i avgassreglementet er naturgass å foretrekke fremfor de tradisjonelle drivstoffene. Tradisjonelle drivstoffer inneholder en mengde helseskadelige hydrokarbonstoffer som blant annet benzen, PAH (Polisykliske Aromatiske Hydrokarboner) og butadiener. Disse stoffene kan ved ufullstendig forbrenning danne andre helseskadelige avgassutslipp. Den alt bedre forbrenningen i moderne dieselmotorer har medført at det aller meste av de toksiske og kreftfremkallende stoffene brenner opp. Problemet med utslipp av meget små mengder uregulerte men sterkt helseskadelige kjemiske stoffer blir stadig mindre (Neumann m fl, 1999).

Naturgass består hovedsakelig av metan. Metan danner normalt ved forbrenning ikke noen toksiske eller kreftfremkallende stoffer. Med tradisjonelle drivstoffer må man både brenne opp de giftige stoffer som finnes i drivstoffene og dessuten sørge for at det i den prosessen heller ikke dannes noen nye.

3 EU's avgasskrav for motorer til tunge biler

For å redusere skadene på helse og miljø gjennomfører EU et omfattende program for å minske avgassutslipp fra alle typer kjøretøyer. Etter at avgasskravene til nye personbiler har medført at bensinbiler har fått alt effektivere treveiskatalysatorer rettes nå oppmerksomheten mot dieselmotorer. EU's avgasskrav til dieselmotorer og spesielt kravene til utslipp av partikler fra motorer til tunge biler skjerpes kraftig fra 2005.

En oversikt over hvordan avgassreglementet for motorer til tunge biler har endret seg fra 1993 (Euro 1) og vil bli skjerpet frem til 2008 (Euro 5) fremgår av tabell 3.1. Tunge biler betyr tunge kjøretøy som veier over 3,5 tonn, som busser og lastebiler. I tillegg til at verdiene på de skadelige utslippene har blitt lavere har testmetodene utviklets for mer å etterligne forholdene i virkelig trafikk. Fra 2005 må alle motorer testes med den nye Europeiske testsyklusen ETC, European Transient Cycle som har varierende belastninger (transiente forløp). ETC syklusen etterligner på en bedre måte hva som skjer i virkelig trafikk enn den tidligere brukte statiske testsyklusen ECE R49. Med de statiske testsyklusene ECE R49 og etterfølgeren og ESC testes motorer ved 13 forskjellige faste (statiske) belastningstilfeller.

Gassmotorer må, da de er mer følsomme for varierende motorbelastninger enn dieselmotorer, allerede fra 2000 testes med testsyklusen ETC.

Avgassutslippene av NO_x , partikler, HC og CO for motorer til tunge biler måles i enheten gram per kilowattime (g/kWh). Dette er en enhet som er mer vanskelig å forholde seg til enn avgassutslipp for biler som angis i gram per kilometer (g/km).

For personbiler og for målinger av avgassutslipp fra busser og andre tunge biler i virkelig trafikk angis utslippene i gram per kilometer (g/km). Avgassutslipp målt i g/kWh viser hvor store avgassutslippene er i forhold til det arbeid (energi) som motoren har utført. Samme sak gjelder for så vidt også for avgassutslipp målt i g/km hvor utslippene relateres til belastningene under en fastsatt kjøresyklus. Kjøresyklusen angir bilens hastighet og akselerasjoner som funksjon av tid.

Det finnes ingen enkel og entydig måte å oversette avgassutslipp målt i g/kWh til avgassutslipp målt i g/km. Motorer med avgassutslippene målt i g/kWh vil få forskjellige avgassutslipp målt i g/km avhengig av i hvilket kjøretøy motoren sitter i og hvordan kjøretøyet kjøres.

De utfordringer for nye motorer til tunge kjøretøy som gjenstår etter at Euro 3 ble innført i 2000 er utslipp av NO_x og partikler. Forbedret forbrenning og oksiderende katalysatorer har fra år 2000 i stort sett løst problemene med utslipp av små mengder uregulerte helseskadelige stoffer (Neumann m fl, 1999). Det blir vurdert som meget vanskelig for store dieselmotorer å klare avgasskravene for 2005 uten spesielt rensutstyr for fjerning av partikler og reduksjon av NO_x .

Tabell 3.1 EU's avgasskrav for nye motorer til tunge biler har blitt skjerpet fra Euro 1 i 1993 og planlegges skjerpet frem til 2008, KILDE: EU's avgassregulativ

	Euro 1	Euro 2	Euro 3		Euro 4		Euro 5	
Test-metode	ECE R49 13-mode	ECE R49 13-mode	ESC ¹	ETC ²	ESC ¹	ETC ²	ESC	ETC ²
År	1993	1996	2000		2005		2008	
NO _x (g/kWh)	8,0-9,0	7,0	5,0	5,0	3,5	3,5	2,0	2,0
Partikler (g/kWh)	0,36-0,68	0,15	0,10	0,16	0,02	0,03	0,02	0,03
HC NMHC CH ₄ (g/kWh)	1,1	1,1	0,66	0,78 1,6 ³	0,46	0,55 1,1 ³	0,46	0,55 1,1 ³
CO (g/kWh)	4,5	4,0	2,1	5,45	1,5	4,0	1,5	4,0

¹ Dieselmotorer og dieselmotorer med oksiderende katalysator

² Dieselmotorer med DeNO_x systemer/partikkelfilter og Gassmotorer

³ Kun Gassmotorer

I praksis blir avgasskravene for tunge biler fra 2005 uavhengig av hvilket drivstoff som brukes. Slik var ikke tilfelle tidligere.

Fra 2005 og Euro 4 blir som vises i tabellen maksimalt tillatte utslipp av partikler redusert med 80 % i forhold til Euro 3 mens utslippet av NO_x blir redusert med 30 %. Fra 2008 blir utslippene av NO_x redusert noe i forhold til Euro 4. Alle disse kravene gjelder nye kjøretøyer og det vil ta 10-20 år før hele den eldre vognparken med mer forurensende motorer er utskiftet. Med de utslippsreduksjoner for både lette og tunge nye kjøretøy som allerede er vedtatt kan vi forvente en fortsatt reduksjon av luftforurensing fra vegtrafikken helt frem til 2025 - 2030. Antall kjøretøy og kjørelengde vil i henhold til de fleste prognoser øke, men ikke i den samme grad som avgassutslippene vil minske.

Målinger i virkelig trafikk har vist seg å gi høyere verdier på både energiforbruk og lokalt forurensende avgasser enn hva som blir målt i avgasslaboratorier. (Pelkmans m fl, 2002). Grunnene til forskjell i avgassutslipp er som innledningsvis nevnt forskjellen mellom varierende og faste motorbelastninger samt at kjøremønstrene kan ha store variasjoner. VITO i Belgia har utført målinger av avgassutslipp fra diesel- og naturgassbusser i virkelig trafikk i perioden 1995 til 2000. Disse målingene viser at den tekniske utviklingen gjennom årene har gjort at alle typer busser har blitt mer miljøvennlige.

Energiforbruket i virkelig trafikk er vanskelig å sammenligne mellom forskjellige kjøretøyer, men naturgassbusser med magermotorer synes generelt å ha ca. 20 % høyere energiforbruk enn tilsvarende busser med dieselmotorer (Pelkmans m fl 2002).

En ny MAN naturgassbuss med λ -regulering og treveiskatalysator oppnådde i virkelig trafikk (1999) NO_x utslipp på kun 2 gram/km. Med denne bussen var også utslippene av andre lokalt forurensende avgasser helt ubetydelige. Problemet med

støkiometrisk forbrenning viser seg å være lav motorstyrke og høyere energiforbruk enn med magermotorer. De forskjellige konseptene for naturgassmotorer blir detaljert drøftet i kapitlene 4-8 i denne rapporten.

I USA blir kravene til avgassutslipp i flere tilfeller enda strengere enn i Europa. På grunn av lavere kostnader ved produksjon av store serier med motorer er det sannsynlig at kjøretøyer i Europa også vil oppfylle de amerikanske kravene. Med strenge avgasskrav for alle drivstoffer er det sannsynlig at fokus, når det gjelder alternative drivstoffer, i større grad vil dreie seg fra lokalt forurensende avgasser til drivhuseffekter og energiforbruk.

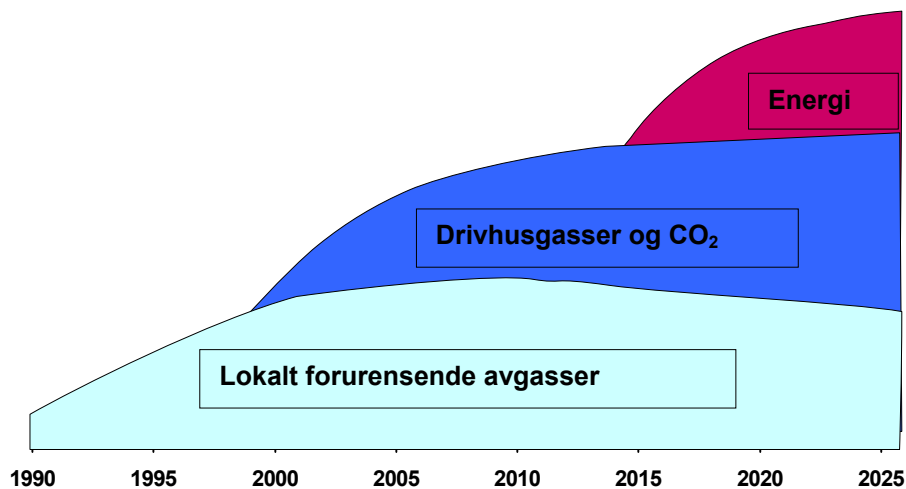


Fig 3.1 Fokuseringen på lokalt forurensende avgasser, som nå i 10-20 år har vært det største problemet fra vegtrafikken, vil sannsynlig bli avløst av utfordringer med drivhusgasser og energiforsyning, KILDE: Oberg, Volkswagen AG

Fokuseringen på lokalt forurensende avgasser, som nå i 10-20 år har vært et stort problem fra vegtrafikken, kan etter hvert bli avløst av utfordringer med drivhusgasser og energiforsyning. Dette synet begynner nå å bli alt mer vanlig innen bilindustrien. Figur 3.1 viser den antatte utviklingen og ble presentert av Dr Oberg fra Volkswagen AG på et nordisk seminar om bærekraftig transportenergi i Oslo 2001 (Steiger og Oberg, 2001).

EU har foreløpig ikke krav på energiforbruk eller hvor store utslippene av CO₂ får lov å være fra nye kjøretøyer. Det finnes likevel mellom EU og de Europeiske bilprodusentenes organisasjon, ACEA en frivillig avtale om å redusere utslipp av CO₂ fra personbiler. Målet er et gjennomsnittlig utslipp av 140 g CO₂ fra nye personbiler i 2008 (Monitoring ACEA's commit on CO₂ emissions, EU 2001). Energiforbruket er for et og samme drivstoff direkte proporsjonalt mot utslippene av CO₂. På så måte har EU allerede begynt å påvirke bilindustrien mot lavere energiforbruk.

3.1 Effekter av variasjon i naturgassens sammensetning

Naturgass er et produkt fra naturgassfelt og sammensetningen av gassen vil variere avhengig av hvor gassen kommer fra. På verdensbasis er det store variasjoner i sammensetningen. Naturgassen blir behandlet og bearbeidet på produksjonsplattformen, og produktet som går ut skal i første rekke tilfredstille kravene til transport i rørledning og behovene til industri og husholdninger. Foreløpig produseres og distribueres ikke naturgass med tanke på å være et optimalt drivstoff for kjøretøyer.

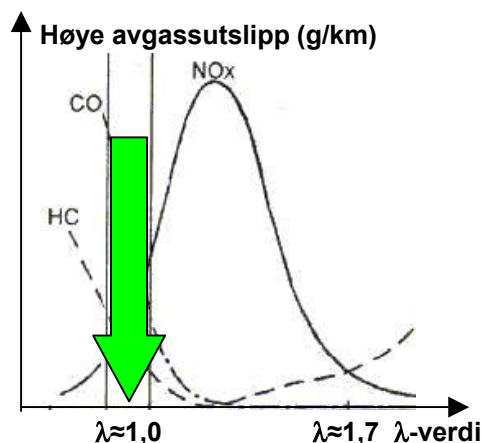
Variasjoner i naturgassens sammensetning kan påvirke avgassutslippene (Ly, 2002). Noen motorer kan klare myndighetenes avgasskrav med en sammensetning av naturgass men ikke med en annen. Forskjellige motorkonsepter er mer eller mindre følsomme for sammensetningen av naturgassen. Motorkonsepter med kontinuerlig regulering av luft/drivstoff blandingen (λ -regulering) er spesielt følsomme for variasjoner i drivstoffets brennverdi, tetthet og støkiometrisk blandingsforhold. Motorstyringen vil helt enkelt regulere feil ved store variasjoner i naturgassens sammensetning.

Figur 3.2 viser hvordan avgassutslippene ut fra selve motoren varierer som funksjon av blandingsforholdet mellom luft og drivstoff (λ -verdien) i en vanlig forbrenningsmotor (Ottomotor). Utslippene av CO og HC fra selve motoren er store når λ er mindre enn 1. Utslippene av NO_x er størst når λ er noe større enn 1. At λ er mindre enn 1 innebærer at vi har en fet luft/drivstoffblanding. At λ er større enn 1 innebærer at vi har en mager blanding. Den brede pilen viser hvordan en treveiskatalysator rensar avgassene ned mot null (HC, CO, NO_x) innen katalysatorens funksjonsområde ($\lambda \approx 1,0$).

Luft/drivstoffblandingen må hele tiden reguleres til å ligge innenfor en moderne treveiskatalysators funksjonsområde ($\lambda \approx 1,0$). Med store variasjoner i naturgassens sammensetning kan reguleringen bli unøyaktig og utslippene av HC, CO, NO_x blir store. Treveiskatalysatoren klarer innen sitt funksjonsområde (λ -vindu) å oksidere HC og CO til vann og karbondioksid, samtidig som NO_x blir kjemisk redusert til Nitrogen og Oksygen. Med store variasjoner i gassenes sammensetning vil reguleringsystemet ikke klare å styre luft/drivstoffblandingen innenfor treveiskatalysatorens funksjonsområde og da blir avgassutslippene store.

Det finnes for EU to referansegasser med naturgass for testing av avgassutslipp. Den ene referansegassen har høy brennverdi (H-gass) og det andre lav (L-gass). Hensikten med to referansegasser er, at hvis en motor klarer de gjeldende avgasskravene med begge gassene, så vil den klare alle på markedet forekommende sammensetninger av naturgasser.

Svovel må også for naturgass holdes på 7-10 ppm for at naturgassmotorer skal kunne bruke avansert teknologi for rensing av avgasser.



Figur 3.2: Avgassutslipp som funksjon av blandingsforholdet mellom luft og drivstoff (λ -verdien) og renseseffekten med en treveiskatalysator ved $\lambda \approx 1,0$

4 Støkiometrisk forbrenning og naturgassmotorer

De gassmotorer for tunge kjøretøy som finnes på markedet bygger på Otto motorens prinsipper. De er dieselmotorer som har blitt konvertert til gassdrift. Ottomotoren er det helt dominerende motorkonseptet for bensin og andre drivstoffer som trenger gnist fra en tennplugg for å antennes i sylindren. I Ottomotorer etterstreses en homogen blanding av luft og drivstoff før blandingen antennes. For å oppnå en homogen blanding blir luft og drivstoff blandet sammen før blandingen suges eller ved hjelp av turboladning presses inn i sylindrene.

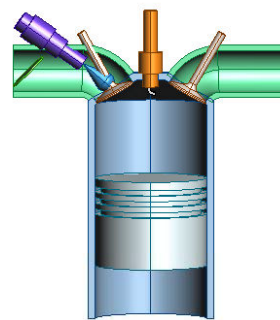
Støkiometrisk forbrenning innebærer i denne sammenheng at blandingsforholdet mellom luft og drivstoff styres av en oksygensensor (λ -sonde). Oksygensensoren regulerer luftmengden slik at avgassene ikke har overskudd eller underskudd på oksygen. Denne reguleringen er nødvendig for å kunne rense avgassene med den effektive treveiskatalysatoren.

På grunn av de store forskjellene mellom Otto- og Dieselmotorer er det ved ombygging til naturgass nødvendig med omfattende forandringer av de eksisterende dieselmotorene. Blanding av luft og drivstoff samt forbrenning skjer på helt forskjellige måter. Forsyningssystemet av drivstoff til motoren må bygges helt om. Motorens kompresjon og stempeltoppens utformning må tilpasses til naturgassens spesielle egenskaper.

Et system for gnisttenning må integreres i motoren og tennpluggen plasseres i sylindertoppen.

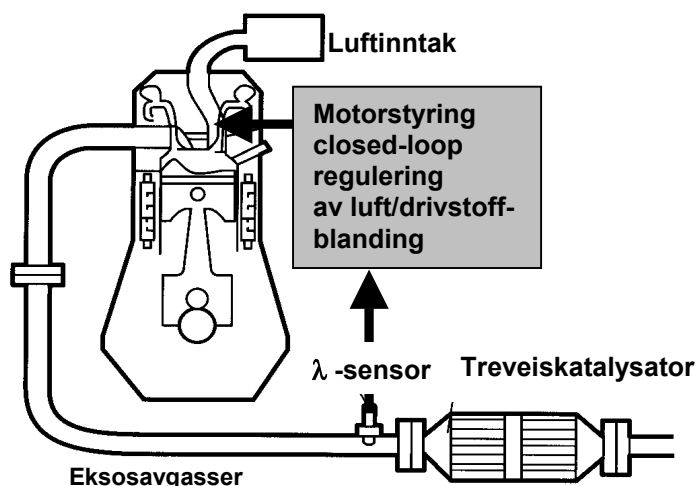
Alle forandringer påvirker motorens holdbarhet og ikke minst påvirker de kostnadene for motoren. Det viser seg at motorprodusentene ofte av økonomiske grunner har en tendens til å begrense antall forandringer og antallet komponenter som skal skiftes. Dagens motorer for naturgass til busser er derfor ikke motorer som opprinnelig er utviklet for naturgass, men som med begrensede resurser er tilpassede til gassdrift.

Hensikten med å ta i bruk naturgassmotorer for tunge kjøretøy har i første rekke vært å redusere de lokalt forurensende avgassutslippene og forbedre luftkvalitet. Med den hensikten har det vært naturlig å velge støkiometrisk forbrenning ($\lambda=1$) for å kunne bruke treveiskatalysator. Treveiskatalysator med λ -regulering og støkiometrisk forbrenning har i personbiler med bensin som drivstoff vist seg å kunne gi renseseffekter når det gjelder lokalt forurensende avgasser på opp mot 99 %.



Figur 4.1: Snitt av en sylinder i en Ottomotor for støkiometrisk forbrenning - Ottomotoren har tennplugg og innblanding av drivstoff skjer i luftkanalen foran innsugingsventilen

Ved forbrenning av en homogen luft/drivstoffblanding skjer innblandingen av drivstoff enklest sentralt i en felles innsugningsmanifold for forbrenningsluften. Avanserte systemer for innblanding av gass har ”multipoint innsprøytingsdyser” rett foran hver sylinder (som vist i figur 4.1). Med innsprøytingsdyser for hver sylinder blir mengden gass og λ -reguleringen av blandingsforholdet mulig å styre med bedre nøyaktighet. Nøyaktig og rask λ -regulering er avgjørende for at katalysatoren skal kunne rense avgassene under varierende motorbelastninger som forekommer i virkelig trafikk. Det er når blandingsforholdet mellom luft og drivstoff kommer utenfor den moderne katalysators funksjonsområde (λ -vindu) som utslipp av HC, CO, NO_x blir et problem. Figur 4.2 viser prinsippene for en Ottomotor med closed-loop λ -regulering og treveiskatalysator.



Figur 4.2: En Ottomotor med closed-loop λ -regulering og treveiskatalysator

Styringen av blandingsforholdet mellom luft og drivstoff (gass eller bensin) baserer seg ved støkiometrisk forbrenning på måling av oksygeninnholdet i avgassene. Målingen av oksygeninnholdet skjer med en λ -sensor i et ”closed loop” system. Regulering med λ -sensor i et ”closed loop” system ble nødvendig i bensinbiler i forbindelse med innføringen av avgassregulativet Euro 1 (i Norge etter 1988). For å unngå risiko for banking (selvantennelse) er kompresjonsforholdet i bensinmotorer ofte kun 10:1.

Maksimal effekten som er mulig å ta ut av gassmotorer til tunge kjøretøyer er med støkiometrisk forbrenning oppgitt til å være 5-15% lavere enn for tilsvarende dieselmotorer (Winsor, Yale og Gauthier, 1992).

Energiforbruket er ved stasjonære belastninger (ECE R49 og ESC) 15-20% høyere enn for dieselmotorer (Havenith og Hilger, 1998). Blandingsforholdet luft/drivstoff styres normalt ved støkiometrisk forbrenning ved at luftmengden strupes med et luftspjeld (throttling). Struping av luftmengden ved hjelp av luftspjeld ved lave motorbelastninger av motoren gir høyt drivstofforbruk.

Ved kjøring i virkelig trafikk, med lave og transiente belastninger, blir forskjellen i drivstofforbruk i forhold til dieselmotoren høyere enn ved stasjonære belastninger. For moderne bybusser med mye start og stopp har forskjellen vist seg å være ca. 30% (Pelkmans m fl, 2002).

4.1 Lokalt forurensende avgassutslipp

Lokalt forurensende avgasser fra gassbusser med støkiometrisk forbrenning og treveiskatalysator blir ved statiske belastninger som ECE R49 og ESC ofte målt til under 1 g/kWh (NO_x, CO og HC). Utslippene av partikler fra gassbusser er ikke målbare eller mindre enn 0,01 g/kWh. Dette er meget bra og burde oppfylle alle krav til lokal miljøforurensing. Ved transiente belastninger og i virkelig trafikk viser det seg dog ofte at utslippene av lokale forurensninger (unntatt partikler) blir større. Avgassutslippene er spesielt store i virkelig trafikk fra naturgassbusser (med støkiometrisk forbrenning) som ble levert i begynnelsen og midten av 1990 tallet. I disse eldre bussene ble gassen blandet med luft i en sentral gassmikser like ved luftinntaket. Reguleringen av luft/drivstoffblandingen ble ikke nøyaktig og treveiskatalysatoren klarte i liten grad å rense avgassene i virkelig trafikk.

Det viser seg at aldri nedsetter effektiviteten hos rensesystemene for avgass. I den fortsatte utviklingen og forbedringen av konseptet med støkiometrisk forbrenning for naturgassmotorer blir det fokusert på forbedret forbrenning og mer nøyaktig λ -regulering. Det er også ønskelig med forbedret oksidasjon av metan ved hjelp av mer effektive katalytiske materialer i treveiskatalysatoren.

Forbrenningen blir forbedret ved hjelp av styrt og kontrollert bevegelse i luft/drivstoffblandingen inne i sylindren. Styling av blandingsforhold blir forbedret ved hjelp av sekvensiell MPI (MultiPoint Induction) for hver enkelt sylinder. Optimering av ventilstyring synes å kunne gi lavere utslipp av uforbrente hydrokarboner.

Betydelige utviklingsressurser settes inn på å forbedre avgassrensingen i katalysatoren. Det legges spesiell vekt på å få forbedret oksidasjonen av metan i katalysatoren ved lave eksostemperaturer og innen et bredere λ -vindu (større variasjon av luft/drivstoffblandingen).

4.2 Energiforbruk

De store ulempene med tradisjonell støkiometrisk forbrenning ($\lambda=1$) er høy temperatur, som gir høyt energiforbruk og større slitasje i motoren. Energiforbruket kan reduseres med høyere kompresjon. Et høyere kompresjonsforhold enn 10:1 burde være mulig uten risiko for banking da naturgass har et oktantal på ≈ 130 (mot ≈ 95 for bensin).

En annen grunn til det høye drivstofforbruket er som nevnt den nødvendige regulering av luftmengden med luftspjeld (throttling). En helt fri og variable ventilregulering i stedet for struping av luftinntaket ville gi store drivstoffgevinster ved lave belastninger av motoren. Teknologi for variabel ventilstyring som er uavhengig av en kamaksel er under utvikling. Helt variabel og uavhengig ventilstyring blir dog foreløpig vurdert som både vanskelig og kostbart.

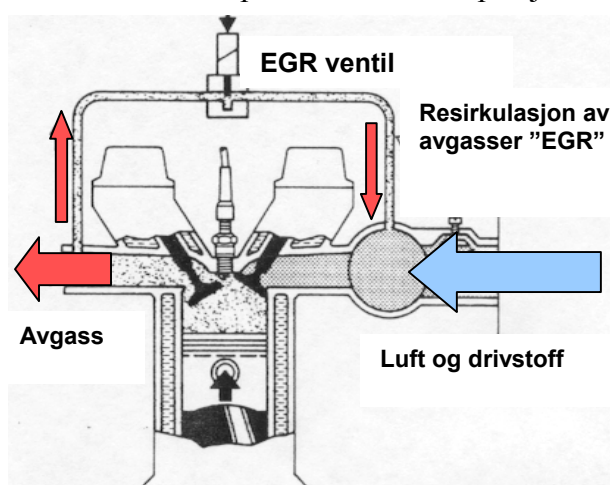
Turboladning og kjøling av innsugingsluften vil øke effektiviteten og derved gi den samme motorstyrken som en motor med større sylindervolum og større energiforbruk. Videre utvikling av motorer til tunge kjøretøy som arbeider etter Ottomotorkonseptet vil sannsynlig dra nytte av de fremskritt som kan forventes med bensinmotorer til personbiler.

4.3 Resirkulasjon av avgasser og støkiometrisk forbrenning

Tradisjonelt betyr mager forbrenning at det ved forbrenningen finnes et overskudd av luft i forhold til drivstoff. Luft inneholder oksygen og kan til dels erstattes med resirkulerte avgasser, som inneholder null eller en liten mengde oksygen.

Resirkulasjon av avgasser EGR, Exhaust Gas Recirculation er en anerkjent og vanlig metode for å minske utslippene av NO_x fra dieselmotorer. Med en EGR-ventil og resirkulering av avgasser vil det være mulig å utnytte fordelene ved mager forbrenning av en homogen drivstoffblanding og kombinere dem med fordelene ved støkiometrisk forbrenning.

En kreativ løsning med ($\lambda=1$) forbrenning av naturgass ved hjelp av resirkulering av avgasser EGR er vist som en fremtidig løsning i en artikkel fra Southwest Research Institute av SwRI (Kubesch, 2000). Her vises et konsept med overskudd på kjølede gasser. De kjølede gassene vil i dette tilfelle bestå av luft og i noen grad vil de bestå av resirkulerte avgasser. Overskudd av den kjølede gassblandingen kan utnyttes for å skape lavere temperatur ved forbrenningen. Hensikten med å skape lavere forbrenningstemperatur er å redusere dannelsen av termisk NO_x .



Figur 4.3: Støkiometrisk ($\lambda=1$) forbrenning ved hjelp av EGR (resirkulasjon av avgasser)

Samtidig kan det med en λ -

sensor og EGR-ventilen være mulig å styre blandingen av luft, resirkulerte avgasser og drivstoff slik at man oppnår støkiometrisk forbrenning. Støkiometrisk forbrenning innebærer også her at λ -sensoren (oksygensensor) styrer luft/drivstoffblandingen slik at det hverken finnes overskudd eller underskudd på oksygen i avgassene. Støkiometrisk forbrenning gir deretter mulighet til bruk av treveiskatalysator.

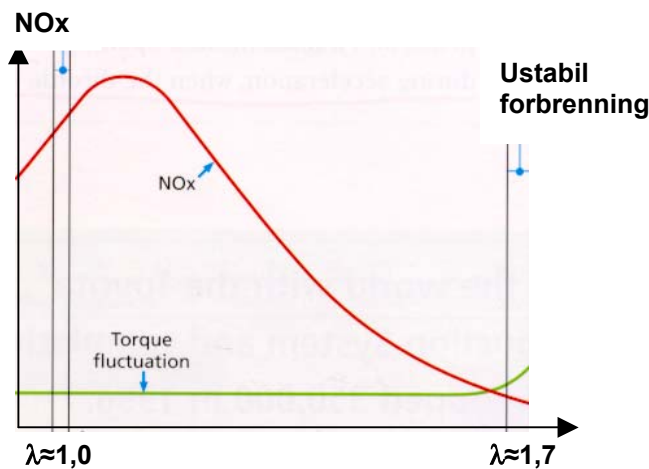
Hvis det viser seg teknisk og økonomisk mulig å oppnå støkiometrisk forbrenning med EGR regulering så kan dette løse mange problemer. Utfordringen er å få resirkulasjon av avgasser til å bli en nøyaktig og driftsikker teknikk.

Forbrenningen av naturgass blir effektiv med høyere kompresjon (13:1) og med en homogen luft/avgass/drivstoffblanding vil drivstofforbruket bli lavt. Det lille som eventuelt skulle finnes kvar av NO_x og HC (metan) kan med kjent teknologi fjernes i en effektiv treveiskatalysator. Støkiometrisk forbrenning med resirkulasjon av avgasser vurderes som en komplisert teknikk og vil kreve meget rask og nøyaktig λ -regulering (closed loop) av luft/drivstoffblandingen. SwRI som har lang erfaring med utvikling av magermotorkonseptet med naturgass for det amerikanske markedet beskriver dette som neste trinn i utviklingen.

5 Mager forbrenning av naturgass

Som for gassmotorer med støkiometrisk forbrenning tar man ved utvikling av magermotorer for gass til tunge kjøretøy utgangspunkt i tilgjengelige dieselmotorer. Tennplugg og tenningsystemer må integreres i motoren på samme måte som ved støkiometrisk forbrenning. En rekke faktorer må tilpasses gass som drivstoff ved mager forbrenning. Forbrenningsrommets utforming, klemspalter mellom stempel og sylinder samt bevegelse (sirkulasjon/swirl) hos luft/drivstoffblandningen er de viktigste faktorene (Stenersen m fl, 1994). Squishareal er en viktig parameter som beskriver forholdet mellom det skålformede forbrenningsrommets areal og hele stempeltoppens areal.

Ved å gå fra støkiometrisk forbrenning til magermotorkonsept er det med gassmotorer mulig å oppnå lavere drivstofforbruk. Termiske tap og dannelsen av NO_x vil bli redusert på grunn av større luftmengde og lavere temperaturer i forbrenningsrommet. Figur 5.1 viser hvordan dannelsen av NO_x minsker som funksjon av mager forbrenning (høyere verdier på λ). Ved λ -verdier over 1,7 er det risiko for motorfusk.



Figur 5.1: Dannelse av NO_x som funksjon av λ ved mager forbrenning. KILDE: *Car for the Earth*, Toyota

Marintek i Trondheim var tidlig ute (begynnelsen av 1990 tallet) med utvikling av magermotorkonsept for naturgass. Dieselmotorer fra både Volvo og Scania ble optimert for mager forbrenning med naturgass. Forandringer og optimering av disse motorene er utførlig beskrevet i en rapport om naturgassdrift med busser og magermotorkonseptet med åpent forbrenningsrom fra 1994.

Volvo og Scania har arbeidet videre med magermotorkonseptet og er nå verdensledende leverandører av naturgassbusser. Volvo er den største leverandøren og har til nå levert ca. 1000 naturgassbusser og leverer årlig ytterligere 100-200 busser med magermotorkonseptet (2002).

Kompresjonsforholdet med magermotorkonseptet og naturgass er økt til ca. 13:1 uten risiko for ukontrollert forbrenning (banking). Ved høy belastning etterstrevs et blandingsforhold mellom luft og gass fra $\lambda \approx 1,5$ til $\lambda \approx 1,7$. Ved lavere belastning av motoren og ved tomgang er det nødvendig med mer naturgass i forhold til luft ($\lambda \approx 1,1$ til $\lambda \approx 1,3$) for å sikre jevn og stabil tenning.

For å redusere utslippene av uforbrent naturgass, HC og CO brukes som på dieselmotorer ofte oksiderende katalysatorer. I motsetning til treveiskatalysatoren fungerer den oksiderende katalysatoren utmerket ved mager forbrenning og overskudd på oksygen.

De uforbrente hydrokarbonene, HC består for naturgass sin del hovedsakelig av metan som trenger en noe høyere temperatur i katalysatoren enn dieselvagasser før å begynne å oksidere ("light off" temperatur). Av den grunn gir katalysatorer med palladium bedre effekt enn katalysatorer med platina.

Ved forbrenning med luftoverskudd, som ved høyere belastninger oppnås med turboladning og kjøling av forbrenningsluften, reduseres de termiske belastningene i motoren. Med reduserte termisk belastning blir slitasjen i motorene mindre og driftsikkerheten større. Maksimal motoreffekt med dagens magermotorer og naturgass blir noe lavere enn med dagens beste dieselmotorer.

Med mer luft til stede under forbrenningen blir temperaturen i motoren lavere og virkningsgraden øker for magermotorer i forhold til støkiometrisk forbrenning. Ved lave motorbelastninger og på tomgang er det nødvendig å redusere luftmengden til motoren med et luftspjeld for å oppnå tilfredstillende blandingsforhold mellom luft og naturgass. Ved motortester med statiske belastninger som i ECE R49 testen har det vist seg at energiforbruket med magermotorkonseptet er relativt lavt. Fullastmålinger med de Scania- og Volvomotorer, som ble optimert som magermotorer for naturgass ved Marintek, viser virkningsgrader på 32 % til 37 %. Den høyeste virkningsgraden for begge motorene ble oppnådd ved turtall på ca. 1200 omdreininger per minutt.

5.1 Lokalt forurensende avgassutslipp

Utslippene av NO_x er som figur 5.1 viser sterkt relatert til λ -verdien. Naturgassmotorer har ofte betydelig bedre verdier på NO_x i forhold til dieselmotorer ved motortester med statiske belastning enn hva som er forholdet mellom de to motortypene i virkelig trafikk.

Tabell 5.1 viser utslipp av NO_x og HC og CO med ECE R49 og ESC testene, som har 13 forskjellige statiske motorbelastninger. Tabellen viser måleverdier for avgassutslipp fra fire magermotorer samt måleverdier fra en motor med støkiometrisk forbrenning og fra en dieselmotor. Verdiene i tabellen er hentet fra Marinteks rapport om utvikling av magermotorkonseptet og VITO's sammenligning av avgassutslipp i laboratorier med avgassutslipp i virkelig trafikk.

Utslippene i tabell 5.1 er angitt i enheten gram per kilowattime (g/kWh). Disse utslippsverdiene fra motorer til kjøretøyer kan ikke direkte sammenlignes med utslipp fra kjøretøyer som er målt i gram per kilometer (g/km). Målinger av utslipp fra motorer ved statiske belastninger kan kun sammenlignes med måleverdier fra andre motorer som også er målt ved statiske belastninger. Avgassmålinger på

gassmotorer ved statiske belastninger bør kompletteres med målinger ved varierende belastninger (ETC testsyklus) og med avgassmålinger i virkelig trafikk.

Med dieselmotorer er måten avgassene måles på et mindre problem. Dieselmotorer får, på grunn av sin direkte innsprøyting og enkle forbrenning av drivstoffet, lignende verdier på avgassutslipp både ved statiske og varierende motorbelastninger. Målinger av avgassutslipp fra dieselmotorer ved statiske belastninger har derfor tradisjonelt gitt et godt bilde også av utslippene i virkelig trafikk. Med avgassrensesystemer for dieselmotorer som styres av reguleringsteknikk vil ikke statiske avgassmålinger gi det samme enkle bildet av hva som skjer i virkelig trafikk. Reguleringsteknikken vil komme inn som meget viktig faktor for hvor godt renseteknologien vil fungere ved varierende motorbelastninger.

I tabell 5.1 har en typiske Euro 2 dieselmotoren høyere utslipp av NO_x enn naturgassmotorene ved statisk belastning. Unntaket er magermotoren fra Cummins som av en eller annen grunn har spesielt høye utslipp av NO_x.

Motoren fra IVECO med støkiometrisk forbrenning og treveiskatalysator viser i tabellen meget lave verdier på alle utslippskomponenter i avgassene. IVECO motoren har ved de statiske belastningstestene også bemerkelsesverdig lavt energiforbruk. Det må bemerkes energiforbruket for forskjellige motorer ikke er direkte sammenlignbart. En liten eller svak motor med lav effekt får mindre energiforbruk enn en stor motor, men den gjør heller ikke den samme nytten i et kjøretøy. Lav motorstyrke er også i henhold til VITO en forklaring på IVECO motorens lave energiforbruk.

Tabell 5.1: Utslipp av lokalt forurensende avgasser fra 5 naturgassmotorer og 1 dieselmotor med ECE R49 og ESC tester (13 statiske belastninger av motorene), KILDER: Marintek og VITO

	Volvo magermotor Marintek 1994	Scania magermotor Marintek 1994	Volvo magermotor Typegodkjenning 1997	Cummins magermotor IEA-AMF 2000 ¹	IVECO Støkiom. forbr. IEA-AMF 2000 ¹	Van Hoel DAF diesel Euro 2 IEA-AMF 2000 ¹
NO_x (g/kWh)	2,5	2,6	2	6,3	0,8	5,7
HC (g/kWh)	2,4	2,2	1	2,3	0,2	0,7
CO (g/kWh)	2,4	2,4	0,01	2,2	1,2	1,3
Partikler (g/kWh)	-	-	<0,01	0,001	0,004	0,10
Energi forbruk (MJ/kWh)	11,4	11,2	-	10,5 ²	11,4 ²	9,7 ²

¹ Testene i 2000 ble utført med den nye Europeiske Statistiske testsyklusen ESC

² Omregnet fra dieselevivalent drivstofforbruk

VITO presenterer avgassmålinger i virkelig trafikk som kompletterer resultatene i tabell 5.1.

I virkelig trafikk hadde nye naturgassbusser med magermotorer fra Volvo, MAN og Cummins med mager forbrenning i 1999 og 2000 utslipp av NO_x i størrelsen 7-26 gram/km. Dette er utslipp av NO_x som er i den samme størrelsen som fra moderne dieselmotorer. Så er spørsmålet om det er akseptabelt med noe NO_x fra naturgassbusser i bytrafikk. Andre lokalt forurensende og helseskadelige utslipp blir i stort sett borte med naturgass og magermotorkonseptet. Ikke minst blir de irriterende og synlige partikkelutslippene fra dieselbusser helt fjernet.

IVECO's nye motor med støkiometrisk forbrenning ga også når den var montert i en buss og ble testet i virkelig trafikk små mengder forurensende avgassutslipp. Utslippene av både HC og NO_x var på under 1 g/km. De lave utslippsverdiene i virkelig trafikk viser at reguleringen (closed-loop) av luft/drivstoffblandingen fungerer tilfredstillende. Nøyaktig regulering er forutsetningen for at treveiskatalysatoren skal fjerne de helseskadelige avgasskomponentene. I virkelig trafikk hadde IVECO bussen dog det klart høyeste energiforbruket av de busser som VITO viser i sine sammenligninger.

5.2 Energiforbruk

Magermotorer oppgis av (Havenith og Hilger, 1998) å ha ca. 15 % lavere virkningsgrad enn tilsvarende dieselmotorer ved den statiske ECE R49 testen. Dette er ca. 5 % bedre enn for motorer med støkiometrisk forbrenning. En sterkt bidragene årsak til den lave virkningsgraden er at dagens magermotorer bruker luftspjeld (throttling) for å redusere luftmengden ved lav belastning.

I virkelig trafikk viser det seg at drivstofforbruker blir høyere enn man skulle vente etter motortestene med statiske belastninger. En utredning om den videre utviklingen av kollektivtrafikken i Bergen (fra 2000) viste at naturgassbusser med mager forbrenning har ca 30 % høyere energiforbruk enn tilsvarende dieselbusser. Bergen og kollektivtraffikkselskapet Gaia har en stor flåte av Volvos naturgassbusser med magermotorer.

Den fremste forklaringen, på at man i virkelig trafikk ikke oppnår så lavt drivstofforbruk som man kunne forvente, antas å være dårlig styring av luft/drivstoff- blandingen under varierende og lave motorbelastninger.

Ved støkiometrisk forbrenning med λ -sensor er det med et godt reguleringssystem mulig å oppnå meget nøyaktig luft/drivstoffblanding med $\lambda \approx 1$ i et lukket styresystem (closed-loop). Den nøyaktige styringen er mulig takket være at λ -sensoren er meget følsom og gir mulighet til meget god regulering i området $\lambda \approx 0,95-1,05$.

Magermotorene har ikke på samme måte en closed-loop regulering som kan styre blandingsforholdet mellom luft og gass til optimal λ -verdi.

En følsom sensor, som sammen med et effektivt reguleringssystem, kunne styre blandingsforholdet innen området $\lambda \approx 1,1$ til $\lambda \approx 1,7$ skulle gjøre magermotoren mer

effektiv under transiente belastninger. Da det ikke finnes slike sensorer brukes i stedet forskjellige gassinnblandningssystemer som i en open-loop konfigurasjon skal styre det optimale blandingsforholdet.

5.3 Fortsatt utvikling med magermotorer

Den fortsatte utviklingen av magermotorkonseptet vil gå mot optimering av forbrenningskammeret for å oppnå bedre forbrenning. Målet er at en homogen drivstoffblanding skal forbrennes uten noen restprodukter og ved så lav temperatur at dannelsen av NO_x blir ubetydelig. Det er innen forskningsmiljøer vist at dette er mulig ved stasjonære motorbelastninger.

Et motorkonseptet som kalles HCCI - Homogeneous Charge Combustion Ignition tar utgangspunkt i selvantennelse av en mager drivstoffblanding. HCCI motoren blir mer utførlig beskrevet i kapittel 8.

Ved Natural Gas Vehicle Word Congress i 2002 ble det i et foredrag oppgitt det ved laboratorieforsøk var oppnådd en virkningsgrad på 42 % med mager forbrenning av homogen luft/naturgassblanding (Seifer, 2002). Hvis det blir mulig å utvikle en naturgassmotor med 42 % virkningsgrad, som både er driftsikker og stabil, vil dette være et meget konkurransedyktig alternativ til dieselmotorer for tyngre kjøretøy. En forbrenningsmotor med så høy virkningsgrad vil også på lengre sikt bli et konkurransedyktig alternativ til hydrogen og brenselceller.

Med turbolading og kjøling av forbrenningsluften vil magermotorkonseptet kunne gi høy motoreffekt. Resirkulering av avgasser (EGR) gir som nevnt i kapittel 4 mulighet for forbrenning ved $\lambda \approx 1$ samtidig som det gir mulighet til bruk av treveiskatalysator. Det beste er imidlertid om forbrenningen er så god og temperaturen så lav at det blir nødvendig med rensing av avgassene.

Det forskes intenst på videre utvikling av magermotoren med naturgass som drivstoff. Regulering av luft/drivstoff blandingen med "closed loop" (λ -regulering) i et område mellom $\lambda \approx 1$ til $\lambda \approx 1,7$ er en utfordring som ikke er løst. Det fremste alternativet til magermotor med homogen blandning er utvikling av forbrenningsteknikk for naturgass i et dieselmotorlignende konsept. Direkte innsprøyting av naturgass i et dieselmotorlignende konsept blir beskrevet i kapittel 6.

6 DING - Naturgassmotor med dieselmotorens egenskaper

Et alternativ for å utnytte naturgassens fordeler som et rent drivstoff er å kombinere naturgass og dieselmotorens virkningsmåte for å oppnå både rene avgasser og høy virkningsgrad. Utfordringen med dette konseptet er at naturgass ikke så lett antenner av seg selv uten må antennes på en eller annen måte.

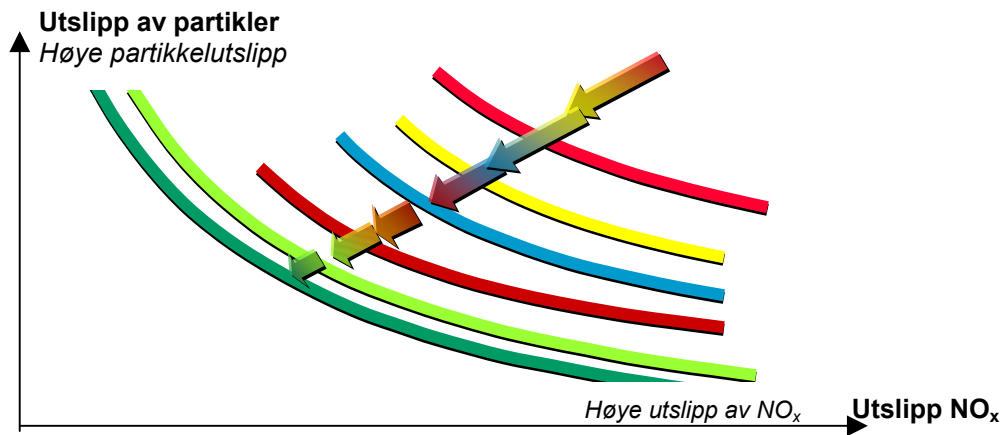
6.1 Dieselmotoren

Forbrenning av drivstoff i en moderne dieselmotor bygger på selvantennelse ved innsprøyting. Diesel sprøytes inn i forbrenningsrommet med høyt trykk straks før, og fortsetter å sprøytes inn noe etter, stemplets øvre dødpunkt. Moderne dieselinjektorer har flere dyser som samtidig sender inn flere stråler med drivstoff i forbrenningsrommet. Drivstoffet sprøytes inn, blander seg med luften og brenner i grenseskiktet mot luften. Dieselmotoren forbrenner på så vis ikke en homogen luft/drivstoffblanding. Homogen luft/drivstoffblanding har vært en forutsetning for de tidligere konseptene som vi har drøftet.

Kompresjonsforholdet i moderne dieselmotorer er i størrelsen 18:1. Drivstoff kan sprøytes inn i forbrenningsrommet etter behov uten at det er nødvendig med regulering av luftmengden til motoren. Dette gjør dieselmotoren til en sterk, enkel og driftsikker motor. Ikke minst har dieselmotoren et for tunge kjøretøy verdifullt høyt dreiemoment ved lave turtall.

I forbrenningsrommet er det totalt sett overskudd av luft i forhold til drivstoff og vi har en mager forbrenning. Lokalt vil det dog finnes områder med fet luft/drivstoffblanding som gir ufullstendig forbrenning. Den lokale ufullstendige forbrenningen gir store utslipp av partikler i avgassene (Kubesch, 2002). Lokalt høye temperaturer andre steder i forbrenningsrommet danner termisk NO_x , som er det andre problemet med dieselmotorer med dieselolje som drivstoff.

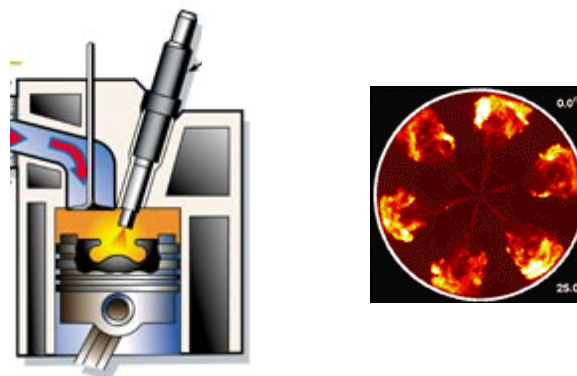
Problematikken med diesel som drivstoff er at høy temperatur under forbrenningen gir høye utslipp av NO_x men lite utslipp av partikler. Lav temperatur gir på den andre siden lite utslipp av NO_x men store utslipp av partikler. Motsetningsforholdet mellom partikkelutslipp og NO_x -utslipp vises i figur 6.1. De buede linjene viser de mulige miljøeffektene av høyere innsprøytingstrykk, forbedret motorstyring, katalysator og andre avgassreducerende tiltak. Vi ser at tiltakene kan brukes for å redusere summen av partikkel og NO_x utslipp fra dieselmotorer, men at det er et motsetningsforhold mellom de to luftforurensingskomponentene (Steiger og Oberg, 2001). Det er vanskelig å finne nye motortekniske tiltak som samtidig reduserer både NO_x utslipp og utslipp av partikler fra moderne dieselmotorer.



Figur 6.1: Motsetningsforhold mellom partikler og NO_x ved tiltak for å minske summen av disse avgassutslippene fra dieselmotorer – KILDE: Oberg, Volkswagen

Med dieselmotorens forbrenningsprinsipp er variasjoner i drivstoffets kvalitet ikke noe problem. Det nødvendige kravet til drivstoffet er at det skal antennes ved høyt trykk. I moderne dieselmotorer er innsprøytingstrykket ca. 200-300 bar. Drivstoffets evne til selvantennelse angis av drivstoffets cetantallet. Høyt cetantall betyr god selvantennelse og rask forbrenning. Bruk av drivstoff med høyt cetantall gir dessuten lavere støy fra dieselmotorer.

Forbrenningsprinsippet for en moderne dieselmotorer med dieselinjektor som samtidig sprøyter inn flere stråler med drivstoff i sylindere vises i figur 6.2.



Figur 6.2: Dieselmotor med snitt av en sylinder samt forbrenningsrommet sett fra oven (ved innsprøyting av diesel), KILDE: Sandia National Laboratories, California, www.ca.sandia.gov

6.2 DING motoren

Westport GmbH i Tyskland har utviklet et konsept for forbrenning av naturgass i dieselmotor. De kaller sitt konseptet for naturgass som drivstoff i en dieselmotorprosess for DING, Direct Induction Natural Gas (Burtanek og Hilger, 2000).

Vi velger her i fortsetningen å bruke DING som benevnelse på motorer som bruker naturgass som drivstoff og som arbeider etter prinsippene til moderne dieselmotorer. Vi gjør dette for å unngå den direkte koblingen mellom

dieselmotorprinsippet og det destillatet av råolje som brukes som drivstoff i dieselmotorer og tradisjonelt kalles diesel eller dieselolje.

Den ledende bedriften innen utvikling av DING motorer er Westport Innovations i Canada som samarbeider med den anerkjente motorprodusenten Cummins i USA. På USA's vestkyst har nå (2002) 14 lastebiler siden 1½ år gått i prøvedrift med prøveinstallasjoner av DING motorer (Ouelette, 2002). Motorene er opprinnelig Cummins dieselmotorer som er konvertert til naturgassdrift. Ytterligere 9 lastebiler vil bli satt i prøvedrift fra begynnelsen av 2003. I den nye serien vil motorene få resirkulasjon av avgasser EGR for ytterligere å redusere dannelsen av NO_x. Bedriften Westport/Cummins oppgir at DING motorer vil være kommersielt tilgjengelige i 2004.

DING motorer har som dieselmotorer et kompresjonsforhold i størrelsen 18:1. Naturgassen sprøytes direkte inn i sylindere via en injektor med mange hull. Innsprøytingen av drivstoff skjer med et trykk på 200 - 300 bar under sluttfasen av stemplets kompresjonsfase.

Forbrenningen av naturgass skjer på overflaten rundt gassmengden som sprøytes inn i forbrenningsrommet. Virveldannelse av luften (swirl) som skapes av sylindertoppens utforming og stempeltoppens geometri bidrar til god forbrenning. Det etterstreses at drivstoffet i en dieselmotorprosess forbrennes under innsprøytingen i sylindere. Drivstoff som når frem til veggen av forbrenningsrommet blander seg ikke så godt med luft og gir dårligere forbrenning. For diesel kalles dette for *wall wetting* og denne effekten er sannsynligvis mindre for gass.

Med et lavt cetantall (≈ 0) er naturgass i utgangspunkt ikke egnet for bruk i motorer med kompresjonstenning (dieselmotorer). I motsetning til diesel som drivstoff starter ikke forbrenningen av naturgass av seg selv når den sprøytes inn i sylindere under høyt trykk. Det finnes beskrevet to forskjellige måter å antenne naturgassen i en DING motor. Innsprøyting av en liten mengde dieseldrivstoff i momentet før innsprøytingen av naturgass kalles pilottenning. Pilottenning innebærer at naturgass sprøytes inn i et forbrenningsrom, hvor det allerede finnes en flamme som antenner naturgassen. Et alternativ til pilottenning er tenning med glødeplugg *hot spot*.

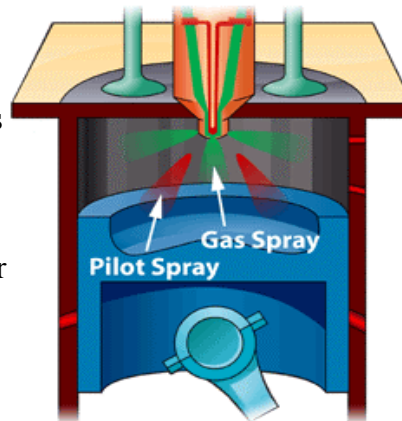
Drivkraften for å utvikle DING motorkonseptet er å kunne oppnå høy virkningsgrad og høyt dreiemoment samtidig med rene avgasser. Dette oppnås ved hjelp av høy kompresjon, direkte innsprøyting av gass og fravær av luftspjeld (throttling) innen hele motorens arbeidsområde. Resultater fra målinger med Westport Cummins motorer viser at er mulig å oppnå nesten den samme virkningsgraden med en DING motor som med tilsvarende dieselmotor.

Når det gjelder lokalt forurensende avgassutslipp i virkelig trafikk og transiente belastninger har DING motoren den fordelen at drivstoffmengden kan doseres til den effekt som ønskes ut fra motoren. Det er ikke behov for regulering av luft/drivstoff blandingsforholdet som ved støkiometrisk eller mager forbrenning. Forskjellig sammensetning av naturgassen er heller ikke noe problem.

Da DING motorer arbeider etter prinsippene til en dieselmotor skal det, i henhold til Westport Innovation, være mulig å bygge om dieselmotorer til naturgass til lavere kostnader enn ved ombygging til Ottomotorer.

6.3 Westport Innovation's DING motor med pilottenning

Det prosjektet med DING motor og pilottenning for motorer til tunge kjøretøy som sannsynlig er kommet lengst og er nærmest kommersiell introduksjon er utviklet av Westport Innovations Canada. Som innledningsvis nevnt finnes det 14 lastebiler (trucks) som siden år 2000 går i prøvedrift i California. Westports konsept for pilottenning av naturgass med diesel vises i figur 6.3.



Figur 6.3: Tenning av natur-gass med pilot-innsprøyting av diesel.
KILDE: Westport - Cummins

Den mest kritiske komponenten i Westports system med pilottenning er drivstoffinjektoren. Drivstoffinjektoren skal med nøyaktig regulering og på kort tid sprøyte inn to forskjellige drivstoffer i sylindere. Det første drivstoffet er diesel og det andre er naturgass. Egentlig er diesel i denne sammenheng ikke et drivstoff, men kun en måte å antenne naturgassen på.

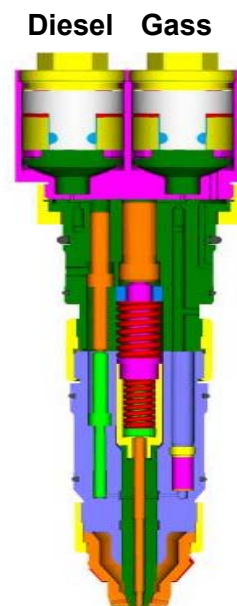
For å kunne forsyne motoren med tilstrekkelig mengde gass er det nødvendig med betydelig større tverrsnitt i tilførselsledningene enn hva som er vanlig med diesel som drivstoff. Anteningen av gassen skjer i tre faser:

- Pilotdiesel sprøytes inn i forbrenningsrommet like før stemplets øvre dødpunkt.
- Dieselstrålen antennes og skaper en flammefront.
- Rett etter pilotinnsprøytingen av diesel sprøytes naturgass inn i forbrenningsrommet og antennes av den flammefront som allerede finnes.

Den største og vanskeligste utfordringen med drivstoffinjektor for to drivstoffer har Westport klart å løse med en injektor som uten modifikasjoner passer direkte inn på plassen til motorens opprinnelige dieselinjektorer. Figur 6.4 viser drivstoffinjektoren med to løp.

Ved tomgang og lav belastning utgjør pilotinnsprøytingen av diesel 10-20 % av det totale energiforbruket. Ved høy belastning av motoren utgjør pilotinnsprøytingen av diesel 4 % av det totale energiforbruket. Mengden diesel som er nødvendig for å tenne gassen er tilnærmet konstant og uavhengig av motorbelastningen. På tomgang bruker motoren kun pilotmengden med diesel for å holde motoren i gang.

Den andre store utfordringen med DING systemet ligger i kontinuerlig forsyning av gass med konstant høyt trykk.



Figur 6.4: Westports drivstoffinjektor for diesel og naturgass til DING motor, KILDE: Westport Innovations

Forsyningssystemer som stjeler nyttig effekt fra motoren er ikke ønskelige. Westport oppgir at høytrykkspumpen for flytende naturgass, LNG, Liquid Natural Gas vil ta 1-2 % av effekten fra drivakselen. Westport oppgir videre at en kompressor for generering av gasstrykk ved lagring av komprimert naturgass CNG, Compressed Natural Gas i trykktanker vil ta 2-3 % av effekten fra drivakselen.

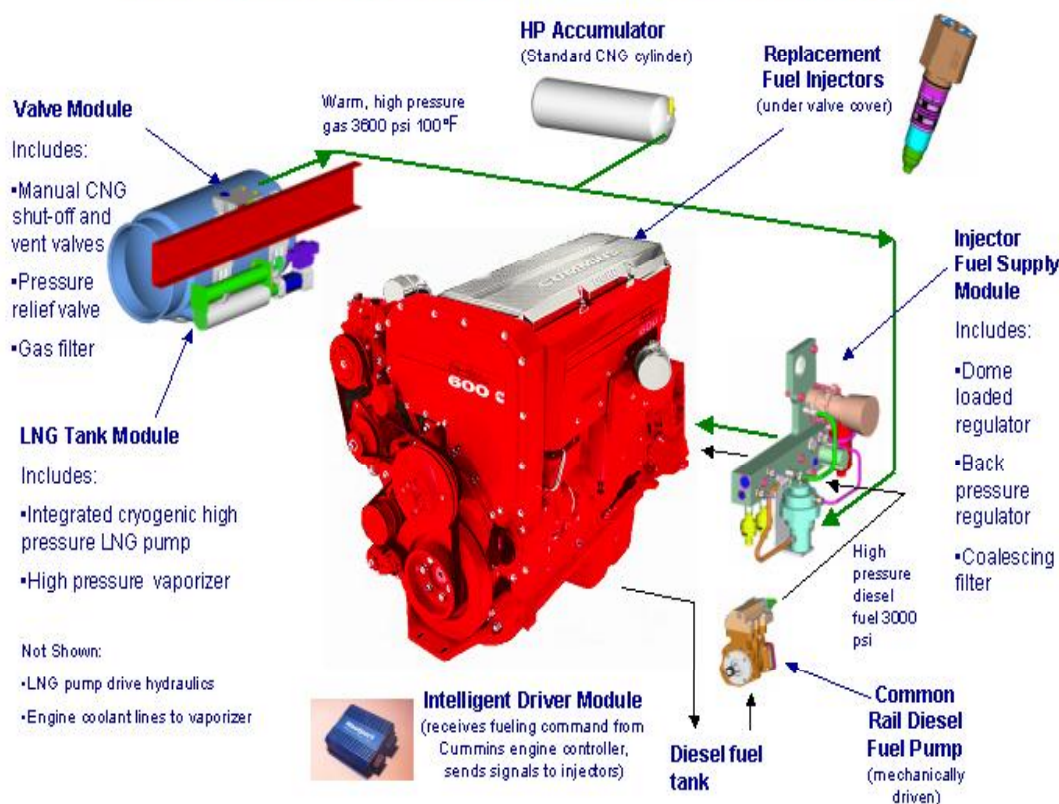
Lastebilene med DING motor har en termostank for flytende naturgass. Det blir vurdert som nødvendig med flytende naturgass for å kunne lagre en tilstrekkelig mengde med naturgass ombord på denne type kjøretøyer. På bybusser vil det som regel være nok å bruke tanker med komprimert naturgass (200-300 bar). På busser lagres naturgassen i tankene på bussens tak.

I tilknytning til termostanken for LNG i lastebilene finnes en sikkerhetsventil som åpner ved 6-7 bar.

Den kalde flytende naturgassen fordampes med en høytrykkspumpe. Etter fordamping i høytrykkspumpen har gassen et trykk på 200 -300 bar . For å virke som en buffer og for å sikre jevn tilgang på gass uten trykkvariasjoner har systemet en standard trykktank som akkumulator.

Det komplette systemet med naturgassdrift, som er montert i de 14 lastebilene vises i figur 6.5.

Drivstoffinjektorene sitter på toppen av motoren. De er i figur 6.5 dekket av motorens toppdeksel. Både diesel til pilottenningen og naturgassen som står for resten av energien blir matet til drivstoffinjektorene med høyt trykk.



Figur 6.5: Westports komplette system med DING motor og pilotinnsprøyting som tar utgangspunkt i Cummins dieselmotorer, KILDE: Westport Innovations

Westport Innovation har ved motortester vist at deres DING motoren gir sammenlignbar motoreffekt og omtrent den samme dreiemomentkurven som den opprinnelige Cummins dieselmotoren. Ved optimering av sine DING motorer kan Westport vise til virkningsgrader som ligger noen få prosent lavere enn den opprinnelige dieselmotoren (Harrington m fl, 2002).

Avgassmålinger viser at utslippene av NO_x blir redusert med 40 % og utslippene av partikler redusert med 60 % med DING motoren sammenlignet med den opprinnelige dieselmotoren. Utslippene av uforbrente hydrokarboner HC fra moderne og effektive dieselmotorer er så lave at de ikke lenger er et problem.

Reduksjonene av NO_x og spesielt reduksjonene av partikler er ikke så imponerende som man kunne ønske med naturgass som drivstoff. Westport vil forsøke å ytterligere redusere NO_x ved hjelp av EGR. Hvordan partikkelutslippene skal kunne reduseres med mer enn 60 % er et problem som må undersøkes nærmere.

En fordel med Westports DING motor er at forandringene i forhold til den opprinnelige dieselmotoren er små. Det er kun drivstoffinjektoren og utstyr for å forsyne denne injektoren med gass av høyt trykk som er helt nytt. Selve forandringen av motoren er derfor, hvis gassforsyningen fungerer, relativt enkel. Samtidig beholdes i stort sett alle dieselmotorens gode egenskaper.

Westport hevder at deres DING motor med pilotinnsprøyting av diesel vil bli økonomisk konkurransedyktig i forhold til dieselmotoren. I henhold til Westports kalkyler vil DING motoren i 2004 ha de samme totale drifts- og investeringskostnader som dieselmotoren. Regnestykket forutsetter priser på naturgass som for samme energimengde er 25 % lavere enn diesel. Regnestykket bygger videre på normal kjørelengde og de kostnader som gjelder i USA.

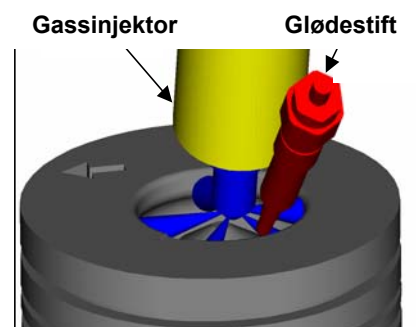
6.4 DING motor med "hot spot" tenning

Problemerkene med utslipp av partikler fra pilot tenningen med diesel kan eventuelt unngås med tenning av naturgassen i DING motoren ved hjelp av glødestift eller "hot spot". Naturgass er sammen med metanol og etanol et av de drivstoffene som egner seg best for tenning med glødestift.

DING motor med "hot spot" tenning er spesielt beskrevet av Burtanek og Hilger GVH mbH/University of Applied Sciences Dortmund (Burtanek og Hilger, 2001).

Forskjellen med dette konseptet i forhold til pilottenning med diesel er at naturgassen her tennes med en "hot spot". Utforming av

brennkammer, glødestift og styring av gassinnsprøyting må optimeres nøye med dette konseptet. Vi kan ikke se at utviklingen av dette konseptet har kommet så langt som konseptet med pilotinnsprøyting av diesel. Optimering er nødvendig for hver enkelt motortype for å kunne oppnå tilfredstillende høy virkningsgrad og god forbrenning ved forskjellige motorbelastninger.



Figur 6.6: Et glødestift kan tenne gassen fra en gassinjektor i en DING naturgassmotor, KILDE: Westport Innovations

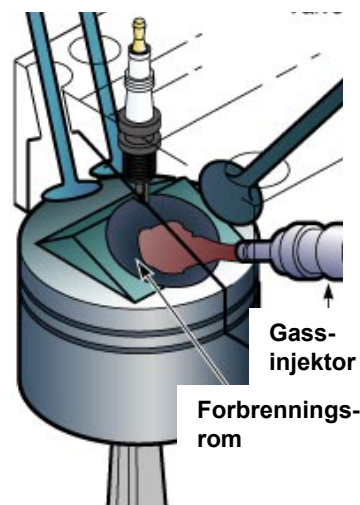
7 Mager forbrenning med direkte innsprøyting og tennplugg

Et annet alternativ for å utnytte naturgassens fordeler som et rent drivstoff er å kombinere naturgass med den ny teknologien for direkte innsprøyting av drivstoff i bensinmotorer. Mitsubishi var først på markedet med dette konseptet og kom med GDI, Gasoline Direkt Injection for sine personbiler på slutten av 1990 tallet. Da vi her fokuserer på naturgass som drivstoff velger vi det mer generelle uttrykket SIDI, Spark Ignition Direct Injection motorer.

Grunnen til interessen for SIDI er mulighetene for lavere energiforbruk i motorer hvor drivstoffet antennes med gnist fra en tennplugg. I en SIDI motor sprøytes drivstoffet direkte inn i sylindern like før stempels øvre dødpunkt på samme måte som i en dieselmotor. Luft/drivstoffblandingen i en SIDI motor er ikke homogen og på grunn av gnisttenningen er starten av forbrenningen mer kompleks enn i en dieselmotor. Figur 7.1 viser stempel, tennplugg og drivstoffinjektor i en SIDI motor.

Med denne teknologien er det en utfordring å få sikker og stabil tenning av luft/drivstoffblandingen under alle mulige driftsforhold. I den nære omgivningen av tennpluggen må blandingen av luft og drivstoff ha en konsentrasjon, som gjør at den er mulig å antenne. Hvis luft/drivstoffblanding på grunn av strømningsforholdene rundt tennpluggen er for mager når gnisten kommer vil vi få motorfusk. Luft/drivstoffblandingen må tennes av tennpluggen under alle motorbelastninger og utformingen av forbrenningsrommet har avgjørende betydning for at dette skal kunne skje.

Blandingsforholdet mellom luft og drivstoff vil undrer innsprøytingsfasen på grunn av luftstrømningen i sylindern variere i nærheten av tennpluggen. Det er nødvendig med omfattende og komplekse simuleringsmodeller for å se effektene av forbrenningsrommets utforming. Plassering av drivstoffinjektor og plassering av tennpluggen vil også påvirke mulighetene til sikker tenning. Det har vist seg mulig å oppnå god forbrenning ved enkelte turtall og belastninger av motoren. Men enkelte turtall og enkelte motorbelastninger er ikke nok. Tidspunkt for innsprøyting av drivstoff og tidspunkt for gnist fra tennpluggen kan forandres av motorstyringen under driftens gang men plassering av tennplugg og drivstoffinjektor er fast.



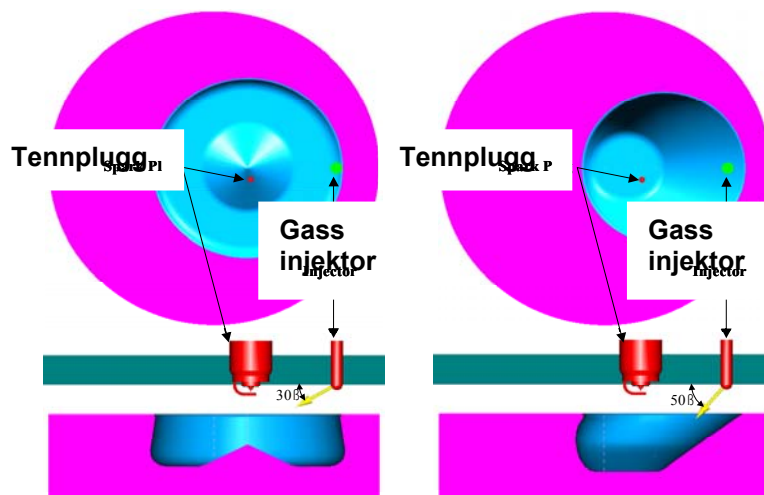
Figur 7.1: Stempel, gass-injektor, tennplugg og ventiler i en direkteinnsprøytet SIDI motor, KILDE: Sandia National Laboratories, California, www.ca.sandia.gov

7.1 Nissans SIDI motor for naturgass

Ny motorutvikling er kompleks og krevende. I Japan har markedet stor interesse av en effektiv naturgassmotor til distribusjonsbiler. I en presentasjon fra Nissan (Honjo m fl, 2002) på NGV 2002 ble status for utviklingen av en SIDI motor i Japan presentert. Presentasjonen viste dog i større grad på vanskeligheter med banking, uregelmessig forbrenning og store avgassutslipp enn på vellykkede resultater.

Forbrenningsrommets utforming blir i Nissans prosjekt optimert for forbrenning av naturgass. Optimeringen skjer ved simulering av luft- og gasstrømninger i forbrenningsrommet. Luft- og gasstrømmingene rundt tennpluggen blir annerledes ved forskjellige turtall på motoren og ved forskjellig mengde med drivstoff. Det er ikke helt sikkert at det er mulig å finne en utforming av forbrenningsrommet med plassering av tennplugg og drivstoffinjektor som gir stabil tenning ved alle turtall og motorbelastninger.

Nissan har gjennomført et stort antall simuleringer med forskjellige plasseringer av tennplugg og gassinjektor. Forbrenningsrommet på toppen av stemplet ble designet for å klare de fleste motorbelastninger. I figur 7.2 ser vi to alternativer til utforming av forbrenningsrommet. Vi ser øverst i figur 7.2 toppen av stemplene med forbrenningsrommene sett fra oven. Nederst i figuren ser vi et snitt av stempeltoppene med forbrenningsrommene, tennplugg og gassinjektorer. Etter simulering av innsprøytingsprosessen ved forskjellige belastninger ble alternativet til høyre i figuren valgt som utgangspunkt for praktiske motortester.



Praktiske forsøk hos Nissan med de valgte konstruksjonsparametrene viste at SIDI motoren fikk en virkningsgrad på samme nivå som en dieselmotor ved lave turtall. Ved høye turtall oppsto uregelmessig forbrenning med høye utslipp av forurensende avgasser. Konklusjonen ble at konseptet kunne fungere, men at mer forskning og utvikling er nødvendig.

7.2 SIDI motor med forkammer for naturgass

Southwest Research Institute, SwRI har lang erfaring med utvikling av magermotorkonseptet for naturgass for det amerikanske markedet. Ved SwRI er det gjort omfattende forsøk med å øke naturgassmotorenes virkningsgrad (Kubesh, 2001). Problemet med lav virkningsgrad på grunn av begrensning av luften til motoren med luftspjeld (throttling) er forsøkt løst på flere måter. På samme måte som i Nissans prosjekt fikk man store problemer med SIDI konseptet. Hos SwRI blir dette konseptet kalt DISC (Direct Injection Stratified Charge).

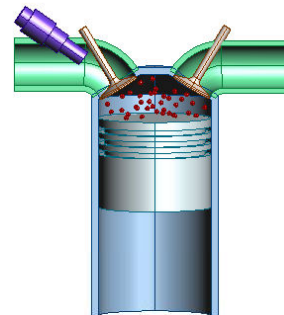
SwRI oppnådde i sine laboratorieforsøk de beste resultatene ved å starte forbrenningen i et forkammer med tennplugg. Optimal størrelse av forkammeret ble funnet å være ca. 10 % i forhold til det totale forbrenningsrommet. Med sitt FIPC (Fuel Injected Prechamber Comustion) konsept oppnådde SwRI lavere utslipp av NO_x og bedre virkningsgrad enn med det opprinnelige magermotorkonseptet.

SwRI's konsept med antenning i et forkammer er en komplisert teknisk løsning. I deler av forbrenningsrommet vil det kunne oppstå meget mager drivstoffblandning (utenfor the lean burn limit). Her er det risiko for ufullstendig forbrenning med utslipp av uforbrent drivstoff (metan).

Vi vet at utviklingen av bensinmotorer med direkte innsprøyting, GDI og tennplugg er en vanskelig prosess. Av arbeidene til Nissan og SwRI ser det heller ikke ut som bruk av naturgass vil gi noen raske snarveier.

8 Homogen drivstoffblanding med kompresjonstenning HCCI

Et nytt mulig attraktivt men komplekst forbrenningskonsept går under betegnelsen HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition). HCCI er et forbrenningskonsept som betegnes som optimalt for å kombinere de beste egenskapene fra homogen luft/drivstoffblanding med dieselmotorens høyere kompresjon og kompresjonstenning. I HCCI motoren blandes luft og drivstoff i innsugningskanalen for å skape et homogent men magert blandingsforhold. Luft/drivstoffblandingen komprimeres så under kompresjonsfasen før den antennes av høyt trykk i sylindere ved stemplets øvre dødpunkt.



Figur 8.1: Snitt av sylinder i en HCCI motor hvor en homogen luft/drivstoffblanding blir komprimert til selvantennelse

Ved Lunds Universitet i Sverige er HCCI konseptet demonstrert i laboriemiljø (Bengt Johansson 1998). Arbeidet ved Lunds Universitet ledes av Bengt Johansson. De store produsentene av motorer til kjøretøy i Sverige viser stor interesse for den videre utviklingen av HCCI konseptet.

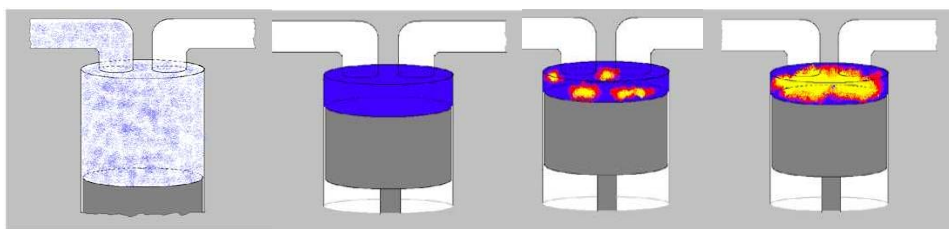
Interessen for HCCI motoren er stor innen universitets- og forskningsmiljøer. Simuleringer og forskning med flere forskjellige drivstoffer og HCCI konseptet foregår blant annet i Sverige, Sveits, USA og Japan.

Veien til en kommersiell motor med HCCI teknologi til tyngre kjøretøy kan være lang. Det er trolig at en HCCI motor for stasjonære applikasjoner, hvor det ikke er nødvendig med varierende belastninger, er enklere og ligger nærmere i tid.

Det er sikker og stabil antenningen av drivstoffblandningen som er utfordringen med HCCI konseptet. Hensikten er at drivstoffblandningen skal antennes straks før stemplet når sitt øvre dødpunkt. Figur 8.2 viser en sekvens hvor en homogen luft/drivstoffblanding først trekkes inn i sylindere. Etter det stenges innsugingsventilen og stempelet komprimerer blandingen til den spontant antennes flere steder i forbrenningsrommet.

Det er foreløpig vist at det er mulig å oppnå god forbrenning med HCCI konseptet ved enkelte motorbelastninger. Uten ytre ekstern start av forbrenningsforløpet blir drivstoffets kjemiske egenskaper den dominerende faktoren for når selvantenningen starter. Risiko for antenning ved ugunstige tidspunkter (banking) er stor. Det er mulig at HCCI motoren kan egne seg best for konstant belastning innen et begrenset turtallsområde. For motorer til tunge kjøretøy kan dette peke mot generering av elektrisk energi og hybriddrift med elektrisk motor.

Naturgass og spesielt ren metan har omtrent den samme spesifikke vekt som luft og har derfor de beste forutsetninger for å danne en homogen drivstoffblandning. Med mager forbrenning av naturgass i HCCI konseptet er det mulig å oppnå enda høyere virkningsgrad enn i en dieselmotor. Grunnen til den høye effektiviteten er at kompresjonsforholdet kan bli i størrelsen fra 15:1 til 21:1. Videre kan forbrenningen av hele luft/drivstoffblandingen skje raskere enn i andre motorkonsepter. Forbrenningen starter som vises i figur 8.2 flere steder i forbrenningsrommet. Både ved gnisttenning og kompresjonstenning i en dieselmotor vil utbredelse av en flammefront medføre at forbrenningen tar lengre tid.



Figur 8.2: En sekvens med innsuging, kompresjon og spontan antenning av en homogen luft/drivstoffblandning i en HCCI motor,
KILDE: http://www.forbrf.lth.se/~per/per_1.htm

Rask forbrenning gir høyere trykk i sylindren og høyere trykk kan gi bedre energiomsetning. På den andre siden vil et altfor høyt trykk i sylindrene kunne ødelegge motoren. For ikke å skape høyere trykk enn hva en forbrenningsmotor kan tåle kan det være nødvendig med mer luft i forhold til drivstoffmengden (magrere blanding). Alternativet til mer luft er resirkulering av avgasser (EGR).

Med en så mager (tynn) blanding av luft og naturgass som er aktuell i HCCI motoren er det vist at utslippene av NO_x blir minimale (ned mot 1 ppm). Under normale forhold gir forbrenning av metan heller ingen utslipp av partikler. Med høy virkningsgrad, tilnærmet null utslipp av NO_x og partikler vil HCCI motoren oppfylle alle krav til en miljøvennlig forbrenningsmotor. Lokale soner i forbrenningsrommet med lite metan i forhold til luft kan dog gi ufullstendig forbrenning med utslipp av uforbrent metan som resultat.

HCCI konseptet trenger ikke som DING eller dieselmotorer et avansert og kostbart system for nøyaktig innsprøyting av drivstoff under høyt trykk. HCCI konseptet skulle derfor i prinsipp være enkelt og prismessig gunstig. For å oppnå et akseptabelt blandingsforhold mellom luft og drivstoff vil det ved varierende motorbelastninger sannsynlig være nødvendig med variabel og individuell styring av ventiltider. Mulighetene til å fritt kunne styre luft og avgassventilenes åpningstider vil være en fordel med alle motorkonsepter og er sannsynlig helt avgjørende for å kunne bruke HCCI motoren i kjøretøy. Videre har forskning vist at det kan være nødvendig med forvarming av luften til motoren for å oppnå kompresjonstenning ved lave motorbelastninger (Kawabata, Nakagawa og Shoji, 1998).

9 Problemer med naturgass i kjøretøy

Tre store utfordringer med naturgass til kjøretøyer er:

- Gode motorer
- Lagring av naturgassen i kjøretøyet
- Tilgang på fyllestasjoner for selve gassen

Mulighetene for utvikling av bedre motorer er diskutert i de foregående kapitlene. Vi vil i dette kapitlet kort drøfte hvilke lagringsmuligheter som finnes i kjøretøy samt ta opp infrastruktur og muligheter til fylling av naturgass.

9.1 Lagring av naturgass i kjøretøy

Naturgass lagres som regel i tanker med høyt trykk. Ved lavt trykk blir energiinnholdet for lavt for praktisk bruk i kjøretøy. Naturgass under trykk kalles CNG (Compressed Natural Gas). Naturgass, CNG med et trykk på 200 bar tar 4-5 ganger så stor plass som tilsvarende energimengde med bensin. Moderne trykktanker med armerte fibermaterialer er lette. Det er plassen som er problemet. Problemet er størst i personbiler som er kompakte, og hvor all tilgjengelig innvendig plass er godt utnyttet. Alle personbiler er opprinnelig konstruert for bensin eller diesel som drivstoff. Montering av en eller flere naturgasstanker i personbiler tar verdifull bagasjeplass og gjør bilene mer upraktiske. En annen ulempe med gass under høyt trykk er at påfyllingen blir mer komplisert og tar noe lengre tid enn tanking av flytende drivstoff.

Det finnes mange modeller av personbiler som kan bruke både bensin og gass. Disse bilene kalles Bi-fuel biler og har en relativt liten tank for naturgass. I Bi-fuel bilene blir det også nødvendig med kompromisser for at motoren skal kunne bruke to så forskjellige drivstoff. I USA produserer Honda en utgave av modellen Civic (Civic GX) som kun bruker naturgass om drivstoff. Med flere biler i hver husholdning, som er vanlig i USA, finnes det et markedet for andre biler uten så stor bagasjeplass og med noe mindre lagringskapasitet for drivstoff.

Trykktanker på taket til bybusser stjeler ikke plass fra andre funksjoner i bussene. Gassen i tankene på taket til en bybuss rekker ofte for et helt driftsdøgn og det er mulig å fylle gass i et sentralt depot om natten. Dette er en av grunnene til at bybusser er det dominerende markedet for bruk av naturgass i kjøretøyer. Med gasstanker på taket blir bussens tyngdepunkt noe høyere, men med lette fibertanker er dette en ulempe som kan aksepteres. I Norge er tilleggsprisen (2002) for en naturgassbuss i forhold til en diesalbuss ca. 450 000 NOK.

Andre kjøretøyer enn bybusser som kan bruke trykktanker og bidra til økt bruk av naturgass i transportsektoren er drosjer og flåter av distribusjonsbiler. Drosjer er personbiler som kan egne seg for naturgass da de kjører i storbyer med forurensingsproblemer og ofte klarer seg uten stor bagasjeplass. Distribusjonsbiler i

byer får noe redusert lastekapasitet med tanker for naturgass. Mangel på plass behøver likevel ikke å være en avgjørende hindring for at denne typen kjøretøy likevel kan kjøres på naturgass for å skape bedre bymiljø.

Det andre kommersielle alternativet for lagring av naturgass er LNG (Liquid Natural Gas) tanker. Lagring av naturgass i flytende form, LNG egner for lastebiler og er også brukt om bord på fergen Glutra i Møre og Romsdal. Naturgass blir flytende ved -162 °C og det kreves relativt mye energi for å kjøle ned gassen til flytende form. På den andre siden leveres gass fra mange avsidesliggende gassfelt med LNG-skip. Naturgass fra avsidesliggende felt leveres i flytende form da det tross alt er mest lønnsomt å kjøle den ned for transport når det ikke finnes rørledninger tilgjengelige. Da gassen allerede ved levering til kunden befinner seg i flytende form vil det ikke bli noen ekstra kostnader for nedkjøling.

Med LNG blir volumet for drivstofftanker mindre enn med CNG. Volumet av LNG blir ca. 2 ganger større enn tilsvarende energimengde med diesel.

LNG oppbevares i kjøretøy i varmeisolererte termotanker. Disse tankene har en sikkerhetsventil som åpner ved et overtrykk på 6-7 bar. Utslipp av naturgass fra LNG-tanker er ikke ønskelig men ikke til å unngå da alle termotanker slipper inn varmeenergi. Varmeenergien varmer opp gassen og sikkerhetsventilen åpner.

Utslipp av naturgass fra varmeisolererte termotanker for LNG er et mindre problem med fulle tanker, og i applikasjoner hvor drivstoffet raskt blir brukt opp. Utslippene er et større problem fra LNG-tanker som står halvfulle under lengre tid. Grunnen til at tankene bør være fulle er, at fordampningen av gass skjer raskere og utslippene blir større, når mengden LNG er liten i forhold til den varmeenergi som slipper inn.

9.2 Fyllemuligheter og infrastruktur for naturgass

Det finnes i utgangspunkt få anlegg for hurtig fylling av naturgass (CNG og LNG). Bygging av nye fyllestasjoner er kostbart. Fyllemuligheter for naturgass er avgjørende for at bilindustrien skal satse på utvikling av nye kjøretøyer. Utvikling av nye kjøretøyer er en forutsetning for vekst av antallet kjøretøyer med naturgass som drivstoff. På den andre siden finnes det ikke interesse av å bygge ut infrastruktur og investere i kostbare fyllestasjoner hvis det ikke er vekst i antallet kjøretøyer.

Det er innlysende at økt bruk av naturgass i transportsektoren er en prosess som tar lang tid. Bruken av naturgass vil, med positive erfaringer fra bruk i busser og lastebiler, kunne spre seg til andre kategorier av kjøretøyer. Distribusjonsbiler og drosjer er eksempler på flåter av biler som med relativt få egne fyllestasjoner kan få en tilfredstillende forsyning med naturgass. Antallet distribusjonsbiler og drosjer med naturgass vil kunne øke som resultat av fokusering på luft i store byer. Økningen vil kunne skje innen geografiske områder som har konkurransedyktige priser på naturgass.

I mange tettbefolkede områder finnes det distribusjonsnett for naturgass til de fleste husholdninger. I USA begynner nå i 2002 et firma å markedsføre personlige tankanlegg som fyller opp bilen fra distribusjonsnettet til husholdningene. Dette kan være en vei for å skape et ekspanderende marked for lette naturgasskjøretøyer.

10 Konklusjon og demonstrasjonsforsøk

10.1 Konklusjon

Metan fra naturgass eller biogass vil være en betydelig energikilde i dette århundre. Så er spørsmålet om fordelene med gass i transportsektoren er større enn ulempene. Til slutt er det markedet som vil avgjøre om gass er å foretrekke fremfor drivstoffer i væskeform. Det går teknisk utmerket å produsere syntetiske flytende drivstoffer med naturgass som utgangspunkt. Kostnadene for denne prosessen gjør dog at prisen per energienhet blir høyere.

For bybusser er naturgass eller biogass nå i 2002 et konkurransedyktig alternativt drivstoff. De byer og distrikter som har adgang til rørledninger med naturgass bruker som regel naturgass som drivstoff til en del av sine bybusser for å oppnå redusert luftforurensing.

Problemer med utslipp av NO_x og partikler fra dieselmotorer har vært den fremste drivkraften for overgang til naturgassmotorer i bybusser. Etter hvert som dieselmotorene får betydelig renere avgasser vil fokus bli rettet mer mot energiforbruk og kostnader for naturgass. Nye rene, sterke og mer effektive naturgassmotorer for tunge kjøretøy er under utvikling.

Om strategien med homogen drivstoffblandning eller direkte innsprøyting for naturgassmotorer vil bli mest fremgangsrik vil bli et spørsmål om kostnader og driftssikkerhet. Spørsmålet om gass eller flytende energibærere er å foretrekke til kjøretøyer, blir nå besvart med at det finnes etterspørsel etter både gass og flytende drivstoffer. På samme måte er det mulig at både forbrenning av homogen drivstoffblandning og direkte innsprøyting av gass kan ha livets rett.

Konkurransen med renere dieselmotorer for tunge kjøretøy vil bli hard. Forskjellen i pris mellom naturgassmotorer og dieselmotorer vil bli redusert da dieselmotorer må utstyres med kostbart utstyr for rensing av avgasser. Videre vil en økende produksjon av naturgassmotorer i store serier gi lavere pris per motor.

Hydrogen vil i de nærmeste 10-20 i årene produseres med naturgass som råvare og energikilde. I livsløpsanalyser (well to wheel) kommer direkte bruk av naturgass i forbrenningsmotor gunstig ut i forhold til bruk av hydrogen og brenselceller. Det fremtidige konkurranseforholdet mellom bruk av hydrogen i brenselceller og bruk av forbrenningsmotorer vil være avhengig av kostnader og driftssikkerhet hos de to helt forskjellige systemene.

Vi har med denne rapporten forsøkt å vise at utviklingsmulighetene med forbrenningsmotorer fortsatt er store og at naturgass er et interessant alternativt drivstoff. Det bred enighet om at naturgassen vil være viktig som energikilde, men som drivstoff for kjøretøyer vil den konkurrere med andre energibærere.

10.2 Demonstrasjonsforsøk

Globalt er naturgass det alternative drivstoff for transportsektoren som vokser raskest. Vi har i denne rapporten analysert ny motorteknologi for naturgassmotorer. Videre var det et mål å foreslå et demonstrasjonsprosjekt med nye og effektive naturgassmotorer i en norsk by som har adgang til naturgass. Hensikten med et demonstrasjonsprosjekt var å stimulere til økt interesse for naturgass.

Vi har hatt kontakt med Scania Norge og drøftet mulighetene for konvertering av Scania dieselmotorer til Westports DING konseptet. Westport Innovations har også forsøkt å interessere Scania i Sverige for sitt konsept. Scania har dieselmotorer som bruker den med samme typen dieselinjektorer som brukes av motorprodusenten Cummins i USA. Scanias motorer vil derfor passe for konvertering til DING motorer med gassinjektorer fra Westport Innovation. Videre har vi vært i kontakt med SAAB i Trollhättan som vurderer naturgassmotorer i personbiler.

Kontaktene med motorprodusentene har ikke resultert i konkrete planer om demonstrasjonsprosjekter. Motorutvikling og utprøving av ny teknikk i kjøretøyer viser seg å være kostbare og komplekse prosjekter.

Motorutvikling til kjøretøyer er en relativt lukket verden. De som deltar i utviklingen får av konkurransegrunner som regel ikke lov til å videreformidle sine resultater. Åpne demonstrasjonsforsøk er ofte ikke aktuelle før et produkt er ferdig utprøvd. Produsenter av motorer til kjøretøyer foretrekker en gradvis utvikling fremfor dramatiske forandringer. Markedet skal ikke bli forstyrret og risikere å utsette investeringer i nye kjøretøyer på grunn av rykter om ny og bedre motorteknologi. Ofte er det kun at når fremtidsutsiktene for en ny teknologi er usikre som det på forhånd blir skapt stor publisitet.

Motorkonseptet med mager forbrenning av en homogen luft/gassblandning synes å være interessant for flere europeiske motorprodusenter. Åpen informasjon om utviklingsarbeidet er dog begrenset.

Konseptet med direkte innsprøyting av naturgass blir åpent markedsført av Westport Innovation som åpenbart ønsker et samarbeid med europeiske motorprodusenter.

Vi ser med de nevnte begrunnelser og de erfaringer som vi har høstet ingen mulighet for å planlegge demonstrasjonsforsøk med rene og mer effektive naturgassmotorer i busser. Mer effektive naturgassmotorer for tunge kjøretøy er ikke modne for demonstrasjonsforsøk i Norge. Forutsetningen for å gå videre med å se på bruk av naturgass i transportsektoren på et nasjonalt plan er at tilgangen til naturgass må avklares nærmere. Det må ses i sammenheng med den nødvendige infrastruktur og øvrig bruk av naturgass i Norge. Vurderinger om videre utbygging av infrastruktur og bruk av naturgass i Norge ser nå ut til å være en mer realistisk oppgave enn demonstrasjonsprosjekter med naturgassmotorer i busser. Situasjonen kan likevel raskt forandres for de områder som vil ha tilgang på naturgass, når det blir tilgang til mer effektive motorer. Tilgang til mer effektive naturgassmotorer vil være avhengig av de store motorprodusentenes markedsvurderinger.

Referanser

- Mats Ekelund, Svensen, Einang, Ekeborg, Blücker, Losciale:
”Nordiska GasBuss projektet, Projekt II Slutrapport ”; Eccotraffic R&D AB,
1993
- Fumitaka Honjo, Akinori Miura, Akira Nakamura, Takayuki Tsuchiya NISSAN
DIESEL MOTOR CO., Ltd.:
”Development of Stratified Charged Combustion CNG Engine”; Paper NGV
2002
- Robert Bienfield, Natural Gas Vehicle Coalition:
”Foredrag ved NGV Conference 2002
- Arne Stølan, Eivind Selvig, Jon Bang, Rolf Gillebo:
”Miljøvennlig teknologi for kollektivtrafikk i Bergensområdet”, 2000
- Malcom C. Wriss, John B. Heywood, Elisabeth M Drake, Andreas Schafer, Felix F.
AuYeun, Massachusetts Institute of Technology – Energy Laboratory:
”On the Road in 2020”, 2000
- Rolf Hagman, Teknologisk Institutt:
”Status for LPG som drivstoff”, 2001
- Neumann et al. Volkswagen AG:
”Unregulated Exhaust Gas Components of Modern Diesel Passenger Cars”, SAE
Technical Paper 1999-01-0514
- W. Steiger, H. J Oberg, Volkswagen AG:
”Future Fuels and Powertrains”, Paper from the Nordic Workshop on
sustainable fuel alternatives in Oslo, 2001
- Monitoring of ACEAS’s Commit on CO₂ Emission Reduction from Passenger Cars
(2001)
- Hien Ly, CFS International:
”Effects of Natural Gas Composition on the Operation, Performance and
Exhaust Emissions of Natural Gas”
- Luc Pelkmans, Guido Lenaers, Dirk De Keukeleer, Vito Flemish Institute for
Technological Research:
”New energy saving and environmentally friendly technologies for buses and
trucks”, Paper from NGV Conference 2002
- Winsor R.E., Yale N., Gauthier S.:
”Development of a Dedicated Natural Gas Transit Coach Engine” 3 rd Biennial
International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicle, Gothenburgh
1992

C. Havenith, U Hilger:

“Development Trends for Heavy-Duty Natural Gas and LPG Engines with Respect to Future Emission Regulations”, FISITA Congress 1998

John T. Kubesch:

“Evolution of an Engine”, Artikkel publisert i Technology Today, Southwest Research Institute, 2000

Dag Stenersen, Per Magne Einang, Ingebrigt Valberg, Frank Andersson, Marintek, SINTEF:

“Magermotorkonseptet med åpent forbrenningsrom”, 1994

Martin Seifer, Swiss Gas and Water Association:

”Gas Engine Development for Mobile Applications”, Presentation at NGV Conference 2002

B. Burtanek, U. Hilger:

”Direct Induction Natural Gas (DING): A Diesel-Derived Combustion System for Low Emissions And High Fuel Economy”, SAE Paper 2000-01-2827

Patric Ouelette:

”High Pressure Direct Injection Natural Gas Engines”, Presentation at NGV Conference 2002

James Harrington, Sandeep Munshi, Costi Nedelcu, Patric Ouelette, Jeff Thompson, Stewart Whitfield:

”Direct Injection of Natural Gas in a Heavy-Duty Diesel Engine”, SAE Paper 2002-01-1630

John T Kubesh, Southwest Research Institute:

“Development of a Throttleless Natural Gas Engine”, SAE Paper 2001-01981388

Bengt Johansson:

"Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition", SAE Paper 980787

Y. Kawabata, K Nakagawa, F Shoji:

”Operating Characteristics of Natural Gas Fueled Homogeneous Charge Compression Ignition”, Energy Technology Research Institute Japan, Annual Technical Report Digest. 1998